



Titre: Planification des réseaux locaux sans fil avec antennes
directionnelles

Auteur: Marc Ouellet
Author:

Date: 2007

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ouellet, M. (2007). Planification des réseaux locaux sans fil avec antennes
directionnelles [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/7942/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7942/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PLANIFICATION DES RÉSEAUX LOCAUX
SANS FIL AVEC ANTENNES DIRECTIONNELLES

MARC OUELLET
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INFORMATIQUE)
AVRIL 2007



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-29248-8

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-29248-8

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

PLANIFICATION DES RÉSEAUX LOCAUX
SANS FIL AVEC ANTENNES DIRECTIONNELLES

présenté par : OUELLET Marc

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. PESANT Gilles, Ph.D., président

M. CHAMBERLAND Steven, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. GALINIER Philippe, Doct., membre et codirecteur de recherche

M. QUINTERO Alejandro, Doct., membre

À Geneviève, qui m'a appris le vrai sens de la vie.

REMERCIEMENT

À M. Steven Chamberland, mon directeur de recherche, pour son encadrement, sa disponibilité et sa grande confiance en mes habiletés.

À M. Philippe Galinier, mon codirecteur de recherche, pour sa passion, sa curiosité et son engouement pour la recherche.

Au Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies, pour un soutien financier des plus appréciés.

À mon père, pour ses encouragements qui me poussent à aller au-delà de moi-même.

À ma mère, pour son amour inconditionnel et sa constante disponibilité, même lorsqu'elle se trouve à des milliers de kilomètres.

À mon grand frère, celui qui a pavé le chemin devant moi, pour ses précieux conseils.

À vous tous, je vous dis merci, du fond du cœur.

RÉSUMÉ

Les réseaux locaux sans fil ont connu une véritable explosion depuis les cinq dernières années. Cependant, cette rapidité de développement a mené à des stratégies de déploiement non coordonnées dans lesquelles les outils d'assistance à la planification sont rarement utilisés. Dans ce mémoire, nous proposons un modèle mathématique pour résoudre efficacement le problème de planification des réseaux locaux sans fil. Les variables de décision du modèle sont la position, la puissance d'émission, le type d'antenne, l'angle d'orientation de l'antenne et le canal de transmission des points d'accès du réseau. À notre connaissance, aucun autre modèle ne permet de sélectionner parmi plusieurs types d'antenne. Aussi, nous permettons l'utilisation de canaux qui se chevauchent pour résoudre le problème d'affectation des fréquences. Les solutions proposées satisfont des contraintes de couverture radio, de débit minimal par utilisateur et de niveau minimal d'interférences sur l'ensemble du réseau. Nos objectifs sont de limiter le coût du réseau et d'assurer un partage équitable des ressources parmi les utilisateurs. Le modèle défini est un programme non linéaire à variables binaires ayant comme objectif la minimisation d'une fonction agrégée.

Le problème étant NP-difficile, nous proposons un algorithme de résolution basé une recherche locale avec tabous. La première phase de l'algorithme vise à obtenir une solution qui satisfait toutes les contraintes alors que la seconde phase de l'algorithme a pour but d'optimiser la solution obtenue par rapport à l'objectif du problème. Un nouveau voisinage, basé sur la couverture radio d'un point d'accès, permet de mieux optimiser les solutions par rapport aux voisinages précédemment proposés dans la littérature. Des résultats numériques montrent que notre algorithme permet d'obtenir des solutions quasi-optimales pour des instances de taille réelle du problème. Aussi, l'utilisation d'antennes directionnelles facilite la recherche de solutions réalisables. Nous croyons que l'utilisation de notre modèle peut sauver temps et argent à tout planificateur de réseau.

ABSTRACT

Wireless Local Area Networks (WLAN) are more deployed today than ever before. However, this rapid growth led to uncoordinated deployment strategies where planning tools are rarely used. In this thesis, we propose a mathematical model to efficiently solve the WLAN planning problem. The problem consists of selecting the location, the transmit power, the antenna and its orientation as well as the communication channel of the access points in the network. To our knowledge, no other model includes the antenna type as a decision variable. Also, the use of interfering channels is allowed to solve the frequency allocation problem. The proposed solutions satisfy a radio coverage constraint, a throughput constraint and an interference level constraint for the entire network. Our objectives are to minimize the cost of the network and to distribute evenly the resources among the network users. The defined model is a nonlinear program with binary variables. The objective is to minimize an aggregate function.

The problem being NP-hard, we propose a two-step tabu search algorithm to obtain good solutions of our model in a reasonable amount of time. The objective of the first step is to obtain a solution that satisfies all the constraints while the second step focuses on optimizing the previously obtained solution in regards to the objective function. A new neighbourhood, based on radio coverage of an access point, allows for a better optimization step compared to previously proposed neighbourhood. The results show that quasi-optimal solutions can be obtained with the proposed approach for real-size instances of the problem. Also, the use of directional antennas allows for a better research of admissible solutions. We believe that the use of our model can save time and money to any network planner.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENT	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
LISTE DES ANNEXES.....	xiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Les hypothèses du problème de planification des WLAN.....	7
1.1.1 La carte de couverture	7
1.1.2 La demande en bande passante	9
1.2 Les variables de décision du problème de planification des WLAN	10
1.2.1 Nombre de points d'accès	10
1.2.2 Position des points d'accès.....	11
1.2.3 Puissance d'émission	11
1.2.4 Type d'antenne.....	12
1.2.5 Canal de transmission	12
1.3 Les objectifs du problème de planification des WLAN.....	13

1.3.1	La couverture radio	13
1.3.2	Les interférences	14
1.3.3	Le débit.....	15
1.3.4	Le coût.....	17
1.4	Les méthodes de résolution du problème de planification des WLAN	17
1.4.1	L'optimisation continue	18
1.4.2	L'optimisation combinatoire.....	18
1.5	Les limites des méthodes actuelles	20
CHAPITRE 2 : MODÈLE PROPOSÉ.....		22
2.1	Formulation générique du problème	22
2.1.1	Les variables.....	22
2.1.2	Les contraintes	22
2.1.3	Les objectifs	24
2.1.4	Les données.....	25
2.2	Formulation mathématique du problème	26
2.2.1	Définition des ensembles	26
2.2.2	Définition des variables de décision	27
2.2.3	Définition des fonctions	28
2.2.4	Définition des paramètres	31
2.2.5	Définition du modèle.....	31
2.2.6	Précisions sur le modèle proposé	33
CHAPITRE 3 : APPROCHES DE RÉOLUTION		38
3.1	Description générale de la recherche avec tabous.....	38
3.2	Schéma général de l'algorithme de résolution	39
3.3	Obtention d'une solution réalisable	40
3.3.1	Contexte de la procédure de l'obtention d'une solution réalisable	40
3.3.2	Description de la procédure de l'obtention d'une solution réalisable.....	41

3.3.3	Procédure RST-k : Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les configurations.....	43
3.3.4	Procédure RST-c : Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les canaux	47
3.4	Optimisation de la solution réalisable	49
3.5	Résumé de l'algorithme de résolution.....	50
3.5.1	Caractéristiques des recherches avec tabous	50
3.5.2	Schéma général de l'algorithme de résolution	51
3.5.3	Logiciel utilisé pour résoudre le problème de planification des WLAN	52
3.6	Discussion et variantes d'approches de résolution.....	54
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET ANALYSE.....		58
4.1	Données de simulation	58
4.1.1	Couche physique et débit d'association : P_{\min} et SNR_{\min}	58
4.1.2	Garantie de débit par utilisateur : N_{\max}	59
4.1.3	Environnements de déploiement.....	60
4.1.4	Autres données de simulation.....	64
4.2	Paramétrage de notre algorithme de recherche	66
4.3	Résultats et analyse	67
4.3.1	Temps de calculs des pré-traitements.....	67
4.3.2	Obtention de solutions réalisables.....	68
4.3.3	Optimisation des solutions réalisables	73
4.3.4	Conclusions et recommandations.....	78
CONCLUSION		80
RÉFÉRENCES.....		85
ANNEXES		87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 – Caractéristiques des recherches avec tabous employées.....	51
Tableau 4.1 – Données de simulation pour le standard 802.11a.....	58
Tableau 4.2 – Données de simulation pour le standard 802.11b	59
Tableau 4.3 – Données de simulation pour le standard 802.11g	59
Tableau 4.4 – Caractéristiques des environnements de déploiement testés.....	64
Tableau 4.5 – Fréquence centrale des canaux 802.11b.....	65
Tableau 4.6 – Facteur d’interférence B en fonction de la distance entre le canal utile et le canal nuisible.....	66
Tableau 4.7 – Valeurs numériques des paramètres de notre algorithme de résolution....	67
Tableau 4.8 – Temps de calculs, en secondes, des pré-traitements	67
Tableau 4.9 – Obtention de solutions réalisables en fonction du voisinage pour nos trois environnements de déploiement.....	69
Tableau 4.10 – Obtention de solutions réalisables avec VS en fonction du type d’antennes pour nos trois environnements de déploiement	71
Tableau 4.11 – Optimisation de 30 solutions réalisables de EA avec 5 AP	74
Tableau 4.12 – Optimisation de 30 solutions réalisables de EB avec 8 AP	76
Tableau 4.13 – Optimisation de 30 solutions réalisables de EC avec 12 AP	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Exemple schématique d'un réseau local sans fil	4
Figure 3.1 – Algorithme de base de la recherche avec tabous	39
Figure 3.2 – Algorithme général de résolution	40
Figure 3.3 – ÉTAPE 1 : Procédure pour l'obtention d'une solution réalisable	43
Figure 3.4 – RST-k : Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les configurations	47
Figure 3.5 – RST-c : Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les canaux	48
Figure 3.6 – ÉTAPE 2 : Procédure pour optimiser une solution réalisable	49
Figure 3.7 – ROT-k : Recherche d'Optimalité avec Tabous sur les configurations	50
Figure 3.8 – Algorithme complet de résolution	52
Figure 3.9 – Logiciel utilisé pour résoudre le problème de planification des WLAN.....	53
Figure 4.1 – Disposition des murs, des points de demande et des sites d'installation des AP sur un étage de EA	61
Figure 4.2 – Disposition des points de demande et des sites d'installation des AP pour EB.....	62
Figure 4.3 – Disposition des murs, des points de demande et des sites d'installation des AP sur un étage de EC	63

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AP	Access Point
BSS	Basic Service Set
dB	Décibel
dBi	Décibel avec puissance de référence une antenne isotrope
dBm	Décibel au dessus d'un milliWatt
ESS	Extended Service Set
FAP	Frequency Allocation Problem
Hz	Hertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
IP	Internet Protocol
Mbps	Megabytes per seconds
NP	Non-déterministe Polynomial
PDA	Personnel Digital Assistant
QoS	Quality of Service
SNR	Signal over Noise Ratio
W	Watt
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Antennes utilisées pour la simulation.....	87
---	----

INTRODUCTION

Les réseaux locaux sans fil (Wireless Local Area Network ou WLAN) ont fait leur apparition au début des années 90, mais c'est seulement lors de l'introduction du standard IEEE 802.11 (Wi-Fi) en 1997, puis de sa ratification en 1999, que les WLAN ont connu une véritable explosion. Aujourd'hui, on les retrouve principalement dans les entreprises, les campus universitaires, les aéroports, les hôtels, les cafés Internet et les résidences personnelles. En 2007, 90% des ordinateurs portables seront vendus d'emblée compatibles avec la technologie Wi-Fi.

Avantages

La popularité des WLAN tient à leur simplicité d'utilisation, à la faiblesse de leur coût de déploiement ainsi qu'à la facilité avec laquelle ils peuvent être intégrés à un réseau existant. En effet, à coût relatif très faible, un utilisateur peut, de n'importe où dans la zone de couverture du réseau, se connecter au réseau local et à Internet sans devoir physiquement brancher son ordinateur au réseau. Les principaux avantages des réseaux locaux sans fil sont les suivants :

Convivialité : Un utilisateur mobile peut se connecter au réseau à l'endroit le plus opportun sans devoir être raccordé par un fil.

Mobilité : L'utilisateur peut se déplacer partout où il le souhaite à l'intérieur de la zone de couverture, tout en demeurant connecté au réseau.

Facilité d'installation : Un réseau local sans fil ne nécessite guère plus qu'un point d'accès relié au réseau existant avant d'être opérationnel. Il n'est pas nécessaire d'installer du filage dans les murs entre chaque élément du réseau, ce qui peut être coûteux, voire même impossible, dans certains cas (bâtiments historiques, centres sportifs).

Flexibilité : Un réseau filaire nécessite d'importants investissements en infrastructure alors que ce n'est pas le cas pour un WLAN. De plus, les points d'accès d'un WLAN peuvent être facilement déplacés pour changer la carte de couverture du réseau. Finalement, les WLAN offrent une plus grande flexibilité quant à leur possibilité d'expansion. En effet, un nouvel utilisateur ne requiert aucun filage pour s'ajouter au réseau et un nouveau point d'accès peut aisément être ajouté pour étendre la carte de couverture du réseau.

Inconvénients

Cependant, les WLAN posent encore quelques inconvénients par rapport aux réseaux filaires :

Sécurité : Les WLAN utilisent des ondes radio comme médium de transmission. Ainsi, il suffit de se trouver dans la zone de portée d'une antenne émettrice pour être en mesure d'intercepter des transmissions.

Portée : La portée typique d'un point d'accès est de l'ordre de quelques dizaines de mètres. L'ajout de répéteurs ou de d'autres points d'accès permet de couvrir l'ensemble d'un bâtiment, mais le coût du réseau s'en voit grandement augmenté.

Fiabilité : Comme toutes les ondes radio, les transmissions sans fil d'un réseau WLAN sont sujets à de nombreuses interférences et phénomènes électromagnétiques. La perte de paquets de transmission y est bien plus fréquente que dans les réseaux filaires.

Débit : La plupart des WLAN déployés aujourd'hui fonctionnent à un débit maximal de 11 Mbps. Le standard 802.11g permet d'atteindre une vitesse maximale de 54 Mbps. Ceci est encore loin des vitesses de 100 Mbps, voire 1000 Mbps, des réseaux Ethernet d'aujourd'hui.

Définition d'un réseau local sans fil

Un réseau local sans fil, en mode infrastructure, possède en son cœur un ou plusieurs points d'accès, ou AP. Ceux-ci établissent le pont entre le réseau filaire et les utilisateurs mobiles. Le réseau filaire fournit l'accès au réseau Internet et à différents serveurs. Les utilisateurs mobiles sont, quant à eux, les stations de travail munies d'une carte d'interface au réseau sans fil (Network Interface Card), tels, par exemple, les ordinateurs portables, les PDA et les téléphones IP. Chaque AP est généralement connecté au réseau filaire, bien qu'il existe des topologies où les AP utilisent un lien radio pour communiquer entre eux.

Les points d'accès permettent aux différentes machines qui lui sont associées de communiquer entre elles ainsi qu'avec le réseau filaire. Ils synchronisent le trafic dans le réseau en allouant des plages de temps où chaque machine a le droit de transmettre, une seule machine à la fois. Le débit de communication des AP est donc partagé parmi tous les utilisateurs qui lui sont associés. Les AP peuvent agir comme passerelle, concentrateur, commutateur ou routeur. La communication se fait à l'aide d'ondes électromagnétiques qui se propagent librement entre deux nœuds du réseau.

L'ensemble des machines associées à un point d'accès forme une cellule (Basic Service Set ou BSS). Chaque AP forme sa propre cellule. Bien que la grande majorité des WLAN ne possèdent qu'un seul AP (et donc une seule cellule), certains WLAN peuvent être constitués de plus d'une cinquantaine de points d'accès. On parle alors d'un Extended Service Set ou ESS. Le déploiement d'un réseau local sans fil de taille aussi grande devient un problème complexe qui nécessite le développement d'outils d'assistance aux planificateurs de réseaux.

Chaque AP émet sur son propre canal de transmission. Le standard 802.11b prévoit 11 canaux de transmission sur la bande de fréquences de l'ISM à 2.4 GHz.

Cependant, chacun de ces canaux a une largeur de bande de 44 MHz et la plupart de ces 11 canaux se chevauchent. En fait, seuls trois canaux (les canaux 1, 6 et 11 centrés respectivement en 2.412, 2.437 et 2.462 GHz) n'interfèrent pas entre eux et peuvent être alloués aux AP d'un WLAN. La réutilisation de canaux est donc nécessaire dans un WLAN à multiples cellules et l'affectation de ceux-ci aux AP est une tâche complexe. La figure suivante présente une vue d'ensemble d'un réseau local sans fil :

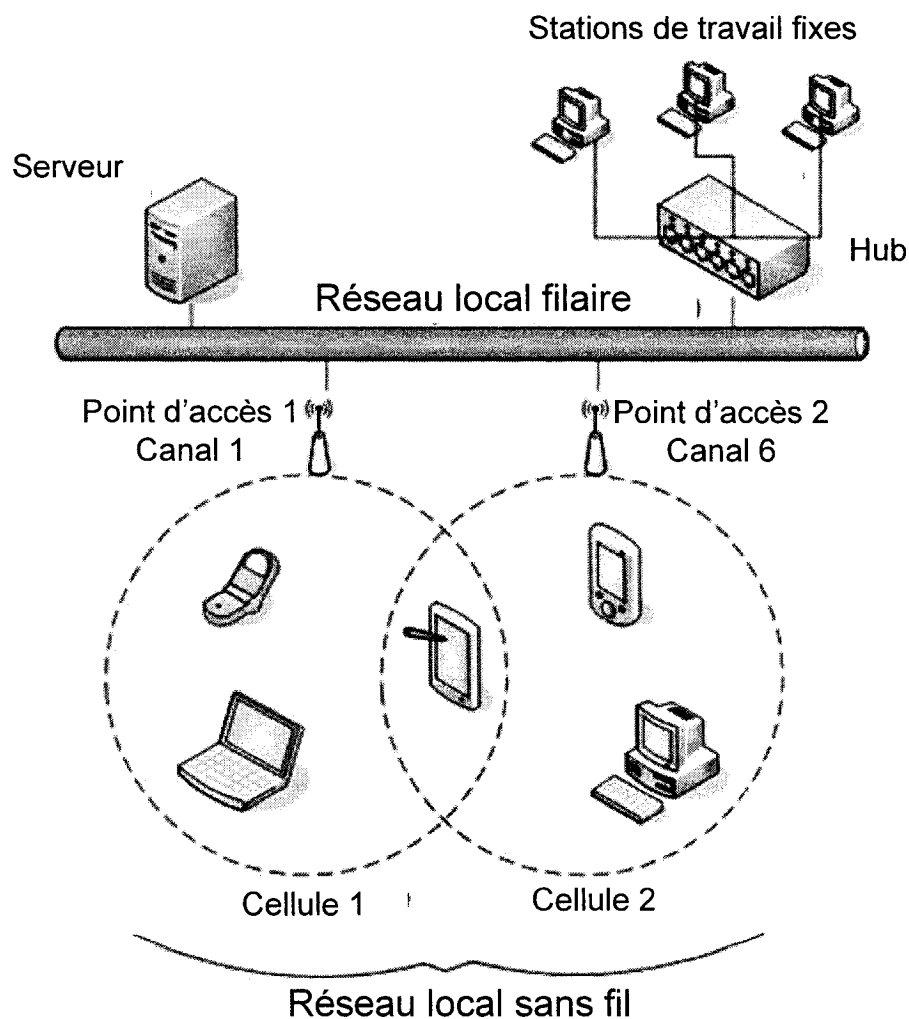


Figure 1.1 – Exemple schématique d'un réseau local sans fil

Problématique

La planification d'un réseau local sans fil se décompose en cinq étapes :

1. **Étude de la demande** : L'environnement de déploiement du WLAN doit être sondé. La superficie de couverture du WLAN ainsi que la position et le nombre d'obstacles (murs, planchers, etc.) de l'environnement doivent être connus. Aussi, une estimation de la demande doit être réalisée. Elle est donnée par le nombre d'utilisateurs, leur répartition dans l'espace et leur besoin individuel en bande passante. On discrétise alors l'environnement en points de demande qui devront être adéquatement desservis par les AP.
2. **Sélection des positions candidates des points d'accès** : Ceci consiste à déterminer un ensemble de points dans l'environnement qui pourront potentiellement servir à accueillir les AP. Typiquement, on essaie que ces positions soient proches d'une source de tension et du réseau filaire existant. Les plafonds constituent d'excellentes positions candidates, tout comme le centre de petites pièces.
3. **Détermination de la carte de couverture** : Il s'agit de connaître, pour chaque point de demande, la puissance du signal reçue depuis chaque position candidate. Ceci permet de connaître l'étendue de la cellule depuis chaque position candidate. Cette étape peut être réalisée à l'aide de mesures ou encore par estimations.
4. **Positionnement et configuration des points d'accès** : À cette étape, il faut sélectionner, parmi l'ensemble des positions candidates, la position des AP qui seront déployés dans le réseau afin de garantir un niveau de qualité de service (QoS) aux utilisateurs. De plus, chaque AP doit être configuré, ce qui implique la sélection de sa puissance d'émission, de son antenne et de son canal de transmission.

5. Validation de la solution : Après l'installation des AP, on teste le fonctionnement de la solution proposée à l'aide de données statistiques prélevées sur le terrain et on procède à quelques ajustements, au besoin.

On peut ainsi définir le problème de planification des réseaux locaux sans fil comme la détermination de la configuration des points d'accès du réseau de manière à garantir un niveau de qualité de service aux utilisateurs. C'est un problème d'optimisation qui a comme variables l'ensemble des configurations possibles des AP et comme objectifs la description mathématique des services que le réseau doit offrir. Le présent mémoire propose comme objectif premier la modélisation et la résolution de ce problème. Les outils informatiques développés permettent de solutionner la quatrième étape de la planification d'une WLAN.

Plan du mémoire

Le plan de ce mémoire suit la méthodologie employée pour atteindre nos objectifs. Il se décompose en quatre chapitres. Le premier chapitre, intitulé *Revue de littérature*, expose les principales approches de résolution du problème de planification des WLAN trouvées dans la littérature. Le chapitre suivant, *Modèle proposé*, présente le modèle que nous avons développé pour tenter de résoudre le problème. Dans le troisième chapitre, *Approches de résolution*, nous présentons l'algorithme de résolution développé pour résoudre notre modèle. Finalement, dans le dernier chapitre, *Résultats et analyse*, nous dévoilons les résultats de nos simulations et discutons de l'efficacité de l'algorithme proposé.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre fait état de l'art sur le problème de planification des réseaux locaux sans fil. Nous débutons sur un exposé des hypothèses typiques et des entrées du problème. La section suivante présente les différentes variables que l'on retrouve dans la littérature pour modéliser le problème de planification des WLAN. Ensuite, sont passées en revue les nombreuses contraintes que doit satisfaire le problème. Finalement, les diverses méthodes de résolution utilisées sur le problème de planification des WLAN sont brièvement abordées.

1.1 Les hypothèses du problème de planification des WLAN

La carte de couverture ainsi que la demande en bande passante de l'environnement de déploiement d'un WLAN sont généralement considérées connues et constituent ainsi des entrées du problème. Leurs caractéristiques sont présentées ci-dessous.

1.1.1 La carte de couverture

Bien que la résolution du problème de planification des WLAN passe par la détermination de la carte de couverture de l'environnement de déploiement, cette dernière est généralement considérée comme une entrée connue du problème et les modèles de résolution développée ne dépendent que très rarement de la manière dont la carte de couverture est déterminée.

La carte de couverture d'un WLAN est la matrice qui fournit, pour chaque point de demande, la puissance reçue en ce point de demande depuis chacune des positions candidates des AP du réseau. Elle permet de déterminer si un point de demande possède

un canal de communication de qualité suffisante pour assurer la transmission de données.

La propagation d'ondes électromagnétiques est sujette à des phénomènes de réflexion, de réfraction et de diffraction qui causent des interférences locales. Dans les environnements typiques de déploiement de WLAN, caractérisés par de nombreux obstacles, ces phénomènes sont amplifiés et rendent très difficile la prédiction exacte de la carte de couverture.

La puissance reçue en un point de demande depuis un AP dépend de la distance qui les sépare, de la nature et du nombre d'obstacles entre ces deux points ainsi que de nombreux phénomènes d'interférences locales. Le simple changement d'angle ou déplacement de quelques centimètres d'un ordinateur portable peut faire varier la puissance reçue d'une dizaine de décibels (voir (Mateus, Loureiro & Rodrigues, 2002)), ce qui est très significatif.

La résolution du problème de planification des réseaux locaux sans fil passe par l'évaluation, avec autant de précision possible, de la carte de couverture de l'environnement de déploiement. Quelques modèles mathématiques, telles les méthodes de lancer de rayons et d'atténuation du chemin, permettent d'obtenir une évaluation assez représentative de la carte de couverture sans trop de calculs par rapport aux modèles déterministes utilisant les équations de Maxwell. Aussi, des modèles empiriques, qui nécessitent parfois un temps considérable pour la prise de mesures sur le terrain, ont été mis de l'avant. Les solutions hybrides, qui se basent sur quelques mesures pour calibrer de manière précise un modèle mathématique, semblent les avenues les plus prometteuses pour déterminer efficacement la carte de couverture de l'environnement de déploiement du WLAN.

(Maksuriwong, Varavithya & Chaiyaratana, 2003), (Prommak, Kabara, Tipper & Charnsripinyo, 2002), (Kouhbor, Ugon, Kruger & Rubinov, 2005) et (Bahri & Chamberland, 2005) utilisent tous un modèle par atténuation du chemin direct qui est dérivé de l'équation de la propagation d'ondes dans l'espace libre. La puissance reçue au point de demande, P_r , est alors donné par :

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p - 20 \log d - \sum_i n_i w_i \quad dB \quad (1.1)$$

où P_t représente la puissance de transmission de l'AP, G_t et G_r représentent respectivement les gains du transmetteur et du récepteur, L_p représente la perte de propagation évaluée autour de 40 dB pour un canal de transmission à 2.4 GHz, d représente la distance, en mètres, séparant le transmetteur du récepteur, n_i représente le nombre d'obstacles de type i et w_i représente l'atténuation d'un obstacle de type i .

(Ling & Yeung, 2005) reprennent une version un peu plus évoluée de ce modèle, un modèle à deux raies (Two-Ray-Ground model) pour effectuer une prédiction de la carte de couverture.

(Runser, 2005) a utilisé un modèle de prédiction de la propagation d'ondes radio basé sur la méthode Multi-Résolution FDPF (Frequency Domaine ParFlow) adaptative pour déterminer la carte de couverture de l'environnement de déploiement. Bien que plus lourde en temps de calculs, cette méthode est reconnue fournir une estimation assez précise de la propagation d'ondes et est particulièrement bien adaptée à la résolution du problème de planification des WLAN.

1.1.2 La demande en bande passante

Pour résoudre efficacement le problème de planification des WLAN, la demande de trafic doit être estimée sur l'ensemble de l'environnement de déploiement. Il s'agit d'évaluer le plus précisément possible le nombre d'utilisateurs mobiles, leur besoin individuel en bande passante ainsi que leur répartition dans l'environnement de

déploiement. L'environnement de déploiement est généralement discrétisé en blocs de taille fixe et les points de demande constituent le centre de ces blocs. Les modèles développés dans la littérature considèrent la demande de trafic comme une entrée du problème. Celle-ci sera estimée si l'on résout une instance réelle du problème ou générée aléatoirement si l'objectif est plutôt de valider le modèle développé pour différentes instances du problème. Pour fins de simplification, une répartition uniforme de la demande est généralement considérée.

(Prommak, Kabara, Tipper & Charnsripinyo, 2002) et (Bahri & Chamberland, 2005) ont partitionné leur environnement de déploiement en blocs de taille fixe où chaque bloc s'est vu attribué une demande de trafic prise dans un ensemble discret de valeurs.

1.2 Les variables de décision du problème de planification des WLAN

Le problème de planification des WLAN a été principalement modélisé par cinq variables différentes. Cependant, à notre connaissance, ces cinq variables n'ont jamais été regroupées dans un même modèle. Elles sont : le nombre, la position, la puissance d'émission, le type d'antenne et le canal de transmission des points d'accès du réseau.

1.2.1 Nombre de points d'accès

Une variable fondamentale dans le problème de planification des réseaux locaux sans fil est le nombre de points d'accès à installer dans le réseau. Il peut être fixe ou variable durant la résolution du problème, et on en évalue généralement une borne inférieure qui dépend bien plus du nombre total d'utilisateurs que de la superficie du réseau à couvrir. Il est courant de vouloir minimiser le nombre d'AP, et donc le coût du réseau, au cours de la recherche afin de limiter les interférences et de faciliter le problème d'affectation des canaux. Or, le coût d'un AP étant pratiquement négligeable

par rapport au coût global de planification d'un réseau, un nombre minimal d'AP ne représente pas nécessairement la meilleure solution, surtout en termes de qualité de service.

1.2.2 Position des points d'accès

Pour limiter l'espace des solutions réalisables, il est courant de discrétiser l'environnement où sera déployé le WLAN. Ainsi, on considère un nombre fini de positions candidates où les AP pourront être installés. Ces positions dépendent de l'environnement de déploiement, en particulier de l'accès au réseau filaire, à une prise de tension ainsi qu'un accès facile pour l'entretien et la maintenance. Aussi, pour des pièces de petite taille (inférieure à 9 m²), le centre de la pièce est généralement représentatif de la carte de couverture de cet AP.

(Maksuriwong, Varavithya & Chaiyaratana, 2003) et (Ling & Yeung, 2005) utilisent comme seules variables de décisions la position des points d'accès, bien que dans le premier cas le nombre d'AP sélectionnés est variable alors qu'il est fixe dans le second cas.

1.2.3 Puissance d'émission

Il est possible de faire varier la puissance d'émission des AP. Plus un AP émet à une puissance élevée, plus il couvrira une grande superficie et donc plus un grand nombre d'utilisateurs lui seront associés. Ceci peut poser un problème de débit, car, rappelons-le, la bande passante d'un AP est partagée parmi tous les utilisateurs qui lui sont associés. Les fabricants d'AP offrent la possibilité de sélectionner environ parmi cinq puissances d'émission différentes.

1.2.4 Type d'antenne

Il existe un grand nombre d'antennes pour point d'accès aux caractéristiques différentes offertes sur le marché. On les classe principalement en deux catégories : les antennes omnidirectionnelles et les antennes directionnelles. Les antennes omnidirectionnelles émettent à puissance constante dans toutes les directions horizontales alors que les antennes directionnelles canalisent leur puissance dans une direction donnée. Chaque antenne se caractérise ainsi par son gain dans une direction donnée, le gain d'une antenne omnidirectionnelle étant constant peu importe la direction alors qu'il varie de manière plus ou moins importante pour une antenne directionnelle selon la direction considérée. Au moment de la rédaction de ce mémoire, aucun modèle de planification de WLAN n'inclut des antennes directionnelles pour des raisons de complexités algorithmiques.

1.2.5 Canal de transmission

Le problème d'affectation des canaux (Frequency Allocation Problem ou FAP) est un problème très connu dans les réseaux cellulaires qui a souvent été modélisé comme un problème de coloriage de graphe. Cependant, il est particulièrement difficile dans le contexte de planification d'un WLAN étant donné le petit nombre de canaux disponibles qui risquent de créer d'importantes interférences s'ils ne sont pas affectés judicieusement. En effet, deux AP physiquement proches l'un de l'autre ne peuvent se voir affecter le même canal sans grandement diminuer la performance du WLAN. Dans la littérature, le problème d'affectation des canaux a été traité simultanément avec le positionnement et la configuration des AP, ou encore a posteriori, une fois les AP positionnés et configurés.

(Prommak, Kabara, Tipper & Charnsripinyo, 2002) et (Bahri & Chamberland, 2005) ont développé un modèle qui tente de déterminer le nombre, la position, la puissance d'émission ainsi que le canal de transmissions des AP. Cependant, leur modèle ne permet pas de considérer le type d'antenne déployée.

(Runser, 2005) ont plutôt opté pour un modèle en deux phases où le nombre, la position et la puissance d'émission des AP sont déterminés en premier lieu et les canaux sont affectés dans un second temps.

1.3 Les objectifs du problème de planification des WLAN

Une revue de littérature a permis de classifier les objectifs du problème de planification des WLAN en quatre grandes catégories : la couverture radio, les interférences, le débit et le coût d'un WLAN. Le terme « objectif » est pris ici dans son sens général : plusieurs modèles traitent ces objectifs comme des contraintes à satisfaire.

1.3.1 La couverture radio

La couverture radio est sans contredit l'objectif le plus fondamental du problème de planification des WLAN. Il s'agit de fournir un service à tous les utilisateurs du réseau. Pour qu'un utilisateur mobile puisse s'associer à un AP, il doit recevoir de ce dernier une puissance minimale supérieure à un certain seuil de sensibilité. Le protocole 802.11b fixe ce seuil à -94 dBm. L'objectif de couverture peut être traité comme une contrainte dure, c'est-à-dire qu'on ne permet pas de trous de couverture et tous les points de demande reçoivent d'au moins un AP la puissance minimale requise, ou encore comme un objectif où l'on tente de minimiser le nombre de points de demande qui ne sont pas couverts.

(Prommak, Kabara, Tipper & Charnsripinyo, 2002) et (Bahri & Chamberland, 2005) ont défini la couverture radio comme une contrainte dure à satisfaire en tout point de l'environnement de déploiement alors que (Kouhbor, Ugon, Kruger & Rubinov, 2005) ont développé une fonction objectif agrégée de trois termes qui maximise la couverture moyenne, la couverture dans le pire cas et un terme de pénalité pour les points de demande non couverts.

(Runser, 2005) tentent de maximiser la couverture radio en introduisant une pénalité pour les points de demande non couverts.

1.3.2 Les interférences

L'objectif de limiter les interférences dans un réseau est étroitement lié au problème d'affectation des canaux. Trop d'interférences dégradent les performances du réseau et augmentent la probabilité de retransmission d'un paquet. Pour qu'un paquet soit efficacement transmis, la puissance du signal utile doit être supérieure à la somme des puissances de tous les bruits environnants, généralement causés par les autres nœuds du réseau qui transmettent en même temps sur le même canal. Plus deux AP émettant sur le même canal sont physiquement rapprochés, plus ils se causeront mutuellement des interférences. Dans le standard 802.11b, le bruit environnant doit être de 22 dB inférieurs à la puissance du signal utile pour permettre une communication à 11 Mbps. Cette valeur correspond au rapport signal sur bruit (Signal over Noise Ration ou SNR). La minimisation des interférences en chaque point de demande est donc un objectif primordial si l'on veut être en mesure d'offrir une bonne qualité de service aux utilisateurs du réseau.

(Maksuriwong, Varavithya & Chaiyaratana, 2003) tentent de maximiser le SNR moyen à travers leur environnement de déploiement.

(Prommak, Kabara, Tipper & Charnsripinyo, 2002) et (Bahri & Chamberland, 2005) ont plutôt défini une contrainte qui assure un niveau d'interférence tolérable en chaque point de demande du réseau.

(Runser, 2005) ont un objectif qui assure que, dans un second temps, l'affectation des canaux pourra être réalisée. Cet objectif limite la puissance que peut recevoir un point de demande depuis les autres AP transmettant sur le même canal.

(Mishra, Rozner, Banerjee & Arbaugh, 2005) ont étudié la possibilité d'utiliser les 11 canaux disponibles du standard IEEE 802.11b pour résoudre le problème d'affectation des canaux. Leurs travaux montrent qu'un utilisateur écoutant sur un certain canal reçoit une puissance atténuée depuis les autres canaux. Par exemple, une transmission sur le canal 6 ne sera nullement perçue sur les canaux 1 et 11, mais sera perçue à 60% sur le canal 3, à 97% sur le canal 7 et, évidemment, à 100% sur le canal 6. Il est ainsi possible d'évaluer les interférences relatives perçues par les utilisateurs du réseau et d'assurer que le bruit environnant, qui peut maintenant provenir de canaux qui se chevauchent, est suffisamment faible pour garantir la qualité de la transmission.

1.3.3 Le débit

Il est important de distinguer le débit d'association d'un utilisateur mobile du débit fourni par un AP. Le débit d'association d'un utilisateur dépend de la puissance reçue de l'AP et du SNR. Le standard 802.11b prévoit quatre débits d'association, soit 11, 5.5, 2 et 1 Mbps. Plus la qualité du signal se dégrade, moins la vitesse de transmission sera élevée. Le débit fourni par un AP est, quant à lui, une moyenne sur la vitesse de transmission des données utiles entre l'AP et l'ensemble des utilisateurs qui lui sont associés. Il est fonction du nombre d'utilisateurs associés à l'AP et de leur débit

d'association. Il diminue avec un nombre croissant d'utilisateurs en raison de l'augmentation du trafic de contrôle et de gestion du réseau.

L'objectif de maximisation du débit est souvent associé à la qualité de service du réseau, bien que nous croyons que la QoS est un terme beaucoup plus large en planification de réseaux. Néanmoins, lors de la planification d'un WLAN, il est important de s'assurer que la solution proposée répond aux besoins des utilisateurs en terme de bande passante et que ceux-ci disposent du débit maximal que la technologie a à leur offrir.

(Ling & Yeung, 2005) proposent, comme objectif au problème, de maximiser le produit de la somme des débits fournis par chaque AP avec une mesure de la variance sur ces débits. Cet objectif tente de maximiser la bande passante disponible aux utilisateurs tout en tentant de maintenir une répartition équilibrée de cette bande passante parmi les utilisateurs mobiles du réseau. Le calcul du débit fourni par chaque AP se place dans le scénario du pire cas où chaque utilisateur mobile a, en tout temps, un paquet à transmettre. Il utilise une évaluation précise de la charge utile et des probabilités de transmission des paquets. (Runser, 2005) ont défini un objectif similaire basé sur une évaluation markovienne des débits fournis par les AP.

(Prommak, Kabara, Tipper & Charnsripinyo, 2002) ont défini une contrainte sur le débit maximal pouvant être fourni par un AP. Elle assure que la demande de trafic des utilisateurs mobiles associés à un certain AP n'excède pas la capacité de transmission de cet AP.

(Lee, Kim & Choi, 2002) minimisent l'utilisation maximale d'un AP en termes de débit, ce qui est fonction de la demande de trafic d'un AP.

(Bahri & Chamberland, 2005) ont une contrainte dure qui assure que chaque point de demande disposera de la bande passante requise.

1.3.4 Le coût

Tel que discuté plus tôt, le principal avantage des réseaux locaux sans fil est qu'ils offrent une solution très économique par rapport aux réseaux filaires. Le coût d'un point d'accès (à partir de 100\$) représente un investissement facile par rapport au coût de déploiement d'un réseau filaire. Néanmoins, il est toujours intéressant, à qualités égales, de sélectionner la solution la moins coûteuse. Les infrastructures d'un WLAN se limitent aux points d'accès qui le composent et il est donc envisageable de sélectionner la solution utilisant le moins d'AP possibles. Il existe cependant un compromis à faire avec le débit disponible par utilisateur puisqu'un nombre plus petit d'AP implique que plus d'utilisateurs devront se partager la même bande passante.

(Maksuriwong, Varavithya & Chaiyaratana, 2003) et (Bahri & Chamberland, 2005) ont développé un modèle qui vise à minimiser le nombre d'AP dans la solution.

1.4 Les méthodes de résolution du problème de planification des WLAN

Une fois les variables et les objectifs de problème définis, il convient de choisir une méthode de résolution adaptée à la nature du modèle développée. Deux grandes familles de méthodes de résolution ont été préconisées pour le problème de planification des WLAN, l'optimisation continue et l'optimisation combinatoire. Toutes deux sont abondamment présentes dans la littérature et leur utilisation dépend généralement du modèle développé et de la formulation mathématique des contraintes et des objectifs.

1.4.1 L'optimisation continue

L'optimisation continue fait référence à la programmation mathématique qui se scinde en la programmation linéaire et la programmation non linéaire. Certaines simplifications judicieuses ont permis d'obtenir des modèles linéaires du problème de planification des WLAN, qui peut alors être résolu à l'aide de CPLEX par exemple, mais les modèles plus récents et plus complets tendent vers des fonctions objectifs non linéaires. Des méthodes locales dérivatives, comme la méthode quasi-Newton et du gradient conjugué, ont fournis d'excellentes solutions au problème posé.

(Kouhbor, Ugon, Kruger & Rubinov, 2005) utilisent l'algorithme à gradient discret avec recherche linéaire d'Armijo pour résoudre leur modèle.

1.4.2 L'optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire est davantage utilisée lorsque l'on travaille avec un nombre fini de solutions réalisables, c'est-à-dire lorsque les variables de décision ont été discrétisés. Les métaheuristiques présentent l'avenue la plus prometteuse pour obtenir de bonnes solutions dans des délais raisonnables à des problèmes combinatoires de grande taille, surtout lorsqu'aucun algorithme de résolution en temps polynomial n'est connu (le problème est alors dit NP-difficile ou NP-complet, respectivement pour un problème d'optimisation ou de décision). La recherche avec tabous ainsi que certaines stratégies évolutionnistes, telle la programmation génétique, ont été les principales métaheuristiques utilisées dans la résolution du problème de planification des WLAN.

(Maksuriwong, Varavithya & Chaiyaratana, 2003) trouvent un ensemble de solutions optimales, celui formant le front de Pareto, en utilisant l'algorithme génétique à objectifs multiples (Multi-Objective Genetic Algorithm ou MOGA) pour trouver des

solutions qui minimisent le nombre d'AP et maximise le SNR moyen. Leurs variables de décision sont la position des AP.

{Lee et al, 2002 [13]} ont développé un programme linéaire en nombres entiers qu'ils ont résolu avec CPLEX alors que {Mateus et al, 2002 [22]} ont résolu un programme similaire avec AMPL, des outils commerciaux très répandus pour résoudre des problèmes d'optimisation.

(Lee, Kim & Choi, 2002) utilisent un algorithme de type glouton pour résoudre leur modèle. À chaque itération, toutes les combinaisons de positions candidates et canaux sont explorées et celle qui maximise la fonction objectif est sélectionnée.

(Prommak, Kabara, Tipper & Charnsripinyo, 2002) ont modélisé le problème comme un problème de satisfaction de contraintes (Capacity based WLAN constraint satisfaction problem ou Cap-WLAN CSP). Sa résolution est réalisée par un algorithme de force brute.

(Bahri & Chamberland, 2005) ont plutôt opté pour un algorithme de recherche avec tabous pour résoudre leur programme mathématique. Les mouvements permis sur une solution sont le changement de la position ou de la puissance d'émission d'un AP. Une heuristique d'initialisation est utilisée pour débiter la recherche avec une solution réalisable. Une version simplifiée du modèle a aussi été résolue à l'aide de CPLEX pour obtenir une borne inférieure.

(Runser, 2005) ont aussi développé un algorithme de recherche avec tabous. Cependant, leur modèle est multi-objectif : maximiser la couverture radio, minimiser les interférences et maximiser la bande passante disponible pour les utilisateurs. Une fonction agrégée de ces trois objectifs a été maximisée pour résoudre la version mono-objectif du problème et le problème multi-objectif a aussi été résolu en se basant sur la

domination de solutions et l'obtention du front de Pareto des solutions réalisables. La définition du voisinage d'une solution est similaire à celle de (Bahri & Chamberland, 2005).

1.5 Les limites des méthodes actuelles

Le modèle de (Maksuriwong, Varavithya & Chaiyaratana, 2003) n'inclut pas l'affectation des canaux dans la résolution du problème.

Bien que (Ling & Yeung, 2005) résolvent simultanément le problème de positionnement des AP et d'affectation des canaux en utilisant une prédiction adéquate du débit fourni par le réseau, leur algorithme de résolution, déterministe, ne permet pas d'obtenir plusieurs solutions à un même problème, même avec relance. L'algorithme se borne à la recherche d'un seul minimum local.

(Prommak, Kabara, Tipper & Charnsripinyo, 2002) emploient un algorithme de recherche par force brute pour résoudre leur problème de satisfaction de contraintes. Pour diminuer le temps de recherche, l'ensemble des positions candidates est sélectionné seulement le long des murs de l'environnement de déploiement, ce qui limite grandement l'espace des solutions. De plus, rien de semble indiquer que le positionnement d'AP le long d'un mur plutôt qu'au centre de la pièce fourni de meilleures solutions. Finalement, une recherche par force brute devient nettement trop coûteuse en termes de temps de calculs pour des instances importantes du problème à résoudre.

Les travaux de (Runser, 2005) et (Bahri & Chamberland, 2005) présentent sans aucun doute les modèles et les méthodes de résolution les plus avancés pour résoudre le problème de planification des réseaux locaux sans fil. Cependant, seul le déploiement d'antennes omnidirectionnelles a été considéré. Aussi, il n'est pas possible de garantir

une certaine QoS dans la solution proposée par (Runser, 2005) puisque sa formulation mathématique se trouve sous forme d'objectifs plutôt que de contraintes.

CHAPITRE 2 : MODÈLE PROPOSÉ

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle que nous avons développé pour résoudre le problème de planification des réseaux locaux sans fil. Dans un premier temps, une formulation générique du problème est présentée. Puis, nous exposons sa formulation mathématique. La dernière section apporte des précisions et des justifications au modèle proposé.

2.1 Formulation générique du problème

2.1.1 Les variables

Dans notre modèle, le problème de planification des réseaux locaux sans fil consiste à choisir les sites d'installation des points d'accès du réseau. Aussi, pour chacun de ces sites, il faut sélectionner la puissance d'émission, le type d'antenne, l'angle d'orientation de l'antenne ainsi que le canal de transmission de l'AP installé. Notre modèle inclut donc cinq catégories de variables : les sites d'installation, les puissances d'émission, les types d'antenne, les angles d'orientation et les canaux de transmission. Au moment de la rédaction de ce mémoire, nous n'avons trouvé, dans la littérature, aucun autre modèle qui permettait la sélection du type d'antenne et de son angle d'orientation.

2.1.2 Les contraintes

L'installation et la configuration d'AP dans le réseau doivent être de telle sorte qu'il existe un lien de communication de qualité entre les utilisateurs mobiles et les AP du réseau. Pour ce faire, il faut être en mesure de garantir certaines caractéristiques au

réseau déployé. Notre modèle inclut trois contraintes qui ont pour but d'assurer la présence d'un lien de communication de qualité pour chaque utilisateur du réseau.

La première contrainte de notre modèle est une contrainte de couverture. Elle garantit que chaque utilisateur recevra d'au moins un AP une puissance supérieure à son seuil de sensibilité. L'utilisateur s'associe avec l'AP duquel il reçoit la puissance la plus élevée. Ainsi, lorsque cette contrainte est satisfaite, chaque utilisateur du réseau peut s'associer à un AP et établir un lien de communication. Les deux contraintes suivantes visent à assurer la qualité de ce lien de communication.

La seconde contrainte est liée au débit disponible par utilisateur. Nous avons vu précédemment que la bande passante d'un AP est partagée parmi les utilisateurs de l'AP. Ainsi, notre contrainte de débit limite le nombre d'utilisateurs pouvant s'associer à un même AP. Ceci assure que chaque utilisateur du réseau disposera d'une bande passante minimale.

Notre troisième et dernière contrainte assure la qualité du lien de communication en termes d'interférences. Les interférences sont responsables de la perte de paquets durant une transmission. Si le niveau d'interférences est trop élevé, la plupart des paquets devront être retransmis et le réseau est de mauvaise qualité. Notre contrainte d'interférences assure que le niveau de bruit subit par chaque utilisateur sera suffisamment faible pour garantir une transmission de qualité où la perte des paquets est négligeable.

Ainsi, notre modèle inclut trois contraintes : la contrainte de couverture, la contrainte de débit et la contrainte d'interférences. Un réseau qui satisfait ces trois contraintes est un réseau qui garantit un lien de communication de qualité pour tous les utilisateurs du réseau. Cependant, plusieurs solutions peuvent satisfaire ces trois contraintes et il semble intuitif que toutes ces solutions ne soient pas équivalentes. C'est

pourquoi notre modèle inclut également deux objectifs qui permettent au planificateur de réseau de comparer les solutions et d'implanter celle qui lui semble la meilleure.

2.1.3 Les objectifs

Un des objectifs les plus fondamentaux lorsque l'on propose une solution est de vouloir limiter le coût de cette solution. Notre modèle ne fait pas exception. Notre premier objectif est donc un objectif de coût. Pour deux solutions qui satisfont toutes les contraintes (nous verrons dans le chapitre suivant que l'on parle ici de solutions réalisables), notre modèle sélectionne la solution qui coûtera le moins cher à déployer. Le coût d'une solution est fonction du nombre de points d'accès installés dans le réseau ainsi que des types d'antennes installées sur chaque AP. Notre objectif de coût minimise le coût de déploiement des AP avec leur antenne respective.

Le second objectif de notre modèle est lié au débit disponible par utilisateurs. Il vise à minimiser la variance sur le nombre d'utilisateurs associés à chaque AP. Toute chose étant égale par ailleurs, il est préférable que chaque AP ait un nombre similaire d'utilisateurs qui lui soient associés. La contrainte de débit assure à chaque utilisateur un débit disponible minimal tandis que l'objectif de débit vise à assurer à chaque utilisateur un débit disponible uniforme.

Notre modèle inclut deux objectifs. Cependant, nous avons décidé de traiter le problème comme un problème mono objectif. Les deux objectifs sont agrégés dans une même fonction qu'il faut minimiser. Le planificateur de réseau peut décider de l'importance à accorder à chacun des deux objectifs. Un paramètre permet de pondérer l'importance relative des deux objectifs dans la fonction à minimiser.

2.1.4 Les données

La résolution de notre modèle se base sur de nombreuses données considérées connues. D'abord, l'ensemble des valeurs possibles des variables constitue une entrée du problème. Une étude de l'environnement de déploiement doit être effectuée afin de déterminer l'ensemble des sites potentiels qui serviront à accueillir les AP. L'ensemble des puissances d'émission et celui des types d'antennes sont ceux spécifiés par le manufacturier des AP. Pour l'ensemble des angles d'orientation des antennes, on peut par exemple sélectionner les angles à tous les 45 degrés ou encore choisir des angles en fonction de la topologie de l'environnement de déploiement. L'ensemble des canaux de transmission dépend de la technologie et du standard utilisés (802.11b prévoit 11 canaux dont 3 ne se chevauchent pas).

La carte de couverture de chacune des configurations des AP doit également être prédéterminée. Elle peut être mesurée directement sur l'environnement de déploiement ou encore être estimée. Pour des fins de simplification, on regroupe les utilisateurs en blocs que l'on nomme des points de demande. On suppose que la puissance reçue à un point de demande depuis un AP est constante pour tous les utilisateurs associés à ce point de demande. À chaque point de demande est associée une densité d'utilisateurs. Dans notre modèle, nous avons défini une fonction qui permet d'estimer la puissance reçue en un point de demande depuis un AP en connaissant l'environnement de déploiement du réseau ainsi que le site d'installation de l'AP, sa puissance d'émission, son type d'antenne, l'angle d'orientation de son antenne et son canal de transmission. À l'aide de cette fonction, la carte de couverture du réseau peut être entièrement pré-calculée. Il est également intéressant de noter que notre modèle ne dépend pas spécifiquement de cette fonction et que le planificateur de réseaux peut décider du modèle de propagation d'ondes qui lui convient le mieux.

Les dernières données de notre modèle ont trait aux contraintes et aux objectifs du problème. La contrainte de couverture requiert que le seuil de sensibilité des utilisateurs soit connu. Il s'agit de la puissance minimale requise pour qu'un utilisateur puisse s'associer à un AP. On la dénote P_{\min} . Elle dépend de la technologie et du standard de communication utilisés et elle détermine le débit d'association des utilisateurs. Le nombre maximal d'utilisateurs pouvant s'associer à un AP, N_{\max} , doit également être connu. Il permet d'évaluer la contrainte de débit et fixe le débit fourni par un AP. On doit également connaître la valeur de SNR_{\min} , le rapport signal sur bruit minimal requis pour assurer que la contrainte d'interférences soit respectée. Le facteur d'interférence qui mesure le degré de chevauchement entre deux canaux doit aussi être évalué avant de résoudre le modèle. Pour l'objectif de coût, le coût d'installation des AP avec leur antenne respective doit être connu. Finalement, puisque notre modèle possède deux objectifs à minimiser, il faut attribuer une valeur au paramètre α ($0 \leq \alpha \leq 1$) qui fixe l'importance accordée à chacun des deux objectifs dans une résolution mono-objectif.

2.2 Formulation mathématique du problème

La présente section expose la formulation mathématique de notre modèle, tel que nous l'avons décrit dans la section précédente. Il est basé sur la programmation mathématique. C'est un programme non linéaire à variables binaires ayant comme objectif la minimisation d'une fonction agrégée.

2.2.1 Définition des ensembles

Soit les ensembles aux valeurs connus suivants :

- I : les points de demande. L'environnement à couvrir est divisé en blocs. Chaque bloc représente un point de demande du réseau. Une densité d'utilisateurs mobiles est associée à chaque point de demande. On suppose que tous les utilisateurs ont des besoins identiques en bande passante.
- J : les sites potentiels pour positionner les AP. On considère généralement les plafonds, près d'une source de tension et d'un câble Ethernet.
- P : les niveaux puissances d'émission d'un AP (en mW). Elles constituent un ensemble discret spécifié par le fabricant.
- A : l'antenne d'un AP. Chaque modèle d'antenne se caractérise par la distribution de son gain dans une direction 3D donnée.
- Θ_a^j : les angles d'installation d'une antenne de type $a \in A$ installée à la position $j \in J$. θ est mesuré depuis le Nord dans le plan horizontal (azimut).
- C : les canaux de communication d'un AP.

2.2.2 Définition des variables de décision

Soit les variables de décision binaires 0-1 suivantes :

- $w^j = 1 \Leftrightarrow$ un AP est installé à la position $j \in J$.
- $x_i^j = 1 \Leftrightarrow$ le point de demande $i \in I$ est desservi par la position $j \in J$.
- $y_p^j = 1 \Leftrightarrow$ la puissance d'émission $p \in P$ est utilisée à la position $j \in J$.
- $z_a^j = 1 \Leftrightarrow$ l'antenne de modèle $a \in A$ est utilisée à la position $j \in J$.
- $u_\theta^j = 1 \Leftrightarrow$ l'angle $\theta \in \Theta_a^j$ de l'antenne $a \in A$ est utilisé à la position $j \in J$.
- $v_c^j = 1 \Leftrightarrow$ le canal de communication $c \in C$ est utilisé à la position $j \in J$.

Une solution du problème de planification des réseaux locaux sans fil est entièrement déterminée par l'affectation de valeurs aux variables de décision. La résolution du problème consiste à déterminer les valeurs des variables de décision qui minimisent la fonction objectif et qui satisfont toutes les contraintes.

2.2.3 Définition des fonctions

Nous présentons ici les fonctions utilisées dans notre modèle.

- Fonction puissance (pour $w^j = 1$ et (2.8) à (2.11) respectées) :

$$F(i, j) = 10 \cdot \log \left(\sum_{p \in P} p \cdot y_p^j \right) + G \left(\theta_i^j - \sum_{\theta \in \Theta_a^j} \theta \cdot u_{\theta}^j, \psi_i^j, \sum_{a \in A} a \cdot z_a^j \right) + 20 \cdot \log \left(\frac{300}{4\pi \cdot f \left(\sum_{c \in C} c \cdot v_c^j \right)} \right) - 20 \cdot \log(d_i^j) - \sum_{k=1..N} n_{ik}^j \cdot \alpha_k \quad (2.1)$$

La fonction puissance détermine la puissance reçue, en dBm, au point de demande $i \in I$ depuis le site $j \in J$. Cette fonction n'a un sens que lorsqu'un AP entièrement configuré est installé au site $j \in J$. Pour cela, il faut que $w^j = 1$ et que la solution courante se trouve dans le domaine admissible des contraintes d'unicité des paramètres (voir section suivante). Il est intéressant de noter que notre modèle ne dépend pas de la manière dont cette fonction est évaluée.

La fonction puissance utilise :

- θ_i^j : l'angle horizontal par rapport au Nord du site $j \in J$ au point de demande $i \in I$. Cette valeur est connue et dépend de l'environnement de déploiement.

- ψ_i^j : l'angle d'élévation entre $i \in I$ et $j \in J$. Cette valeur est connue et dépend de l'environnement de déploiement.
- $G(\theta, \psi, a)$: le gain, en dBi, de l'antenne de type $a \in A$ dans la direction d'azimut θ et d'élévation ψ . Il s'agit d'un tableau de valeurs spécifié par le manufacturier de l'antenne.
- $f(c)$: la fréquence, en MHz, du canal $c \in C$. Ceci est déterminé par la technologie utilisée.
- d_i^j : la distance, en mètre, entre $i \in I$ et $j \in J$. Cette valeur est connue et dépend de l'environnement de déploiement.
- n_{ik}^j : le nombre d'obstacles de type k entre $i \in I$ et $j \in J$. Cette valeur est connue et dépend de l'environnement de déploiement.
- α_k : l'atténuation, en dB, de l'obstacle de type k . Cette valeur peut être aisément mesurée dans l'environnement de déploiement.
- Facteur d'interférence :

$$B(c, c') = \frac{P_c}{P_{c'}} \quad (2.2)$$

Cette fonction détermine le facteur d'interférence entre le canal $c \in C$ et $c' \in C$, avec $P_{c'}$, la puissance reçue sur le canal c' lors d'une transmission sur le canal c' et P_c , la puissance reçue sur le canal c lors d'une transmission sur le canal c' . Il s'agit d'une valeur normalisée sur un l'intervalle $[0,1]$ qui mesure le degré de chevauchement entre les canaux c et $c' \in C$. La fonction est considérée comme connue et constitue une entrée du problème. Se référer à (Mishra, Rozner, Banerjee & Arbaugh, 2005) pour de plus amples détails sur le calcul de cette fonction.

- Fonction coût : $\Gamma(a)$

Elle détermine le coût (en \$) d'un point d'accès équipé d'une antenne de type $a \in A$. On suppose que le coût d'installation d'un AP avec son antenne ne dépend pas du site $j \in J$. Sa valeur est connue dans la résolution de notre modèle.

- Fonction utilisateurs :

$$N(j) = \sum_{i \in I} x_i^j \rho_i \quad (2.3)$$

La fonction utilisateurs détermine le nombre d'utilisateurs desservis par le site $j \in J$. La constante ρ_i représente la densité d'utilisateurs dans le point de demande $i \in I$ et doit être estimée avant la résolution du modèle.

- Fonction objectif de coût :

$$FO_1 = \left[\sum_{j \in J} w^j \cdot \left(\Gamma \left(\sum_{a \in A} a \cdot z_a^j \right) \right) \right] \quad (2.4)$$

FO1 est liée à notre objectif de coût. Elle détermine le coût des AP installés avec leur antenne correspondante.

- Fonction objectif de débit :

$$FO_2 = \left[\sum_{j \in J} \left(w^j \cdot N(j)^2 \right) \cdot \sum_{j \in J} w^j \right] \quad (2.5)$$

FO2 est liée à notre objectif de débit. Elle détermine la variance du nombre d'utilisateurs par cellule.

- Fonction objectif :

$$FO = \alpha FO_1 + (1 - \alpha) FO_2 \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (2.6)$$

FO est la fonction objectif qu'il faut minimiser. α est un paramètre de notre modèle. Pour $\alpha = 1$, on cherche une solution de coût minimal alors que pour $\alpha = 0$, on

cherche une solution où le débit est le mieux réparti parmi l'ensemble des utilisateurs.

2.2.4 Définition des paramètres

Soit les paramètres connus suivants :

- P_{\min} : le seuil de sensibilité, en dBm, d'un utilisateur mobile.

La puissance reçue en un point de demande depuis au moins un AP doit être supérieure à ce seuil pour assurer un lien de communication.

- SNR_{\min} : le rapport signal sur bruit minimal, en dBm, en un point de demande.

La puissance du signal utile doit être d'au moins SNR_{\min} supérieure au bruit environnant pour assurer un lien de communication.

- N_{\max} : le nombre maximal d'utilisateurs pouvant être associés à un AP.

La bande passante étant partagée parmi les utilisateurs associés à un même AP, le fait de limiter le nombre maximal d'utilisateurs par AP permet de garantir une certaine qualité de service.

La valeur de ces trois paramètres est déterminée par le planificateur de réseau et dépend de la technologie utilisée et de la qualité de service à garantir.

2.2.5 Définition du modèle

Nous présentons ici le modèle mathématique que nous proposons pour résoudre le problème de planification des réseaux locaux sans fil :

$$\text{Minimiser FO} \quad (2.7)$$

Sujet à

- Contraintes d'unicité des paramètres des points d'accès :

$$\sum_{p \in P} y_p^j = w_j \quad (j \in J) \quad (2.8)$$

$$\sum_{a \in A} z_a^j = w_j \quad (j \in J) \quad (2.9)$$

$$\sum_{\theta \in \Theta_a^j} u_\theta^j = w_j \quad (j \in J) \quad (2.10)$$

$$\sum_{c \in C} v_c^j = w_j \quad (j \in J) \quad (2.11)$$

- Contraintes de couverture :

$$\sum_{j \in J} x_i^j = 1 \quad (i \in I) \quad (2.12)$$

$$x_i^j \leq w_j \quad (i \in I, j \in J) \quad (2.13)$$

$$(p_{\min} - F(i, j)) \cdot x_i^j \leq 0 \quad (i \in I, j \in J) \quad (2.14)$$

$$(F(i, j') - F(i, j)) \cdot x_i^j \leq 0 \quad (i \in I, j \neq j', j \in J, j' \in J) \quad (2.15)$$

- Contrainte de débit :

$$N(j) - N_{\max} \leq 0 \quad (j \in J) \quad (2.16)$$

- Contrainte d'interférences :

$$\sum_{j \in J} x_i^j \cdot F(i, j) - 10 \cdot \log \left[\sum_{j' \in J} 10^{\frac{F(i, j') (1 - x_i^{j'})}{10}} \cdot B \left(\sum_{c \in C} c \cdot v_c^{j'}, \sum_{j \in J} x_i^j \cdot \sum_{c \in C} c \cdot v_c^j \right) \right] \geq SNR_{\min} \quad (i \in I) \quad (2.17)$$

- Contraintes d'intégralité :

$$w \in B^{|J|}, x \in B^{|I||J|}, y \in B^{|P||J|}, z \in B^{|A||J|}, u \in B^{|\theta||J|}, v \in B^{|C||J|} \quad (2.18)$$

Les contraintes d'unicité des paramètres imposent que pour chaque AP installé au site $j \in J$, on sélectionne une puissance d'émission (2.8), une antenne (2.9), un angle (2.10) ainsi qu'un canal de transmission (2.11). La fonction puissance (2.1) peut seulement être déterminée lorsque les contraintes (2.8) à (2.11) sont satisfaites. Les contraintes (2.12) à (2.15) imposent respectivement que tous les points de demande $i \in I$ soient affectés à un et un seul site $j \in J$, qu'un point de demande $i \in I$ soit affecté au site $j \in J$ seulement si un AP en j est installé, qu'un point de demande $i \in I$ reçoive au moins la puissance minimale P_{\min} pour pouvoir s'associer au site $j \in J$ et qu'un point de demande $i \in I$ s'associe avec le site $j \in J$ duquel il reçoit la puissance maximale. (2.16) limite le nombre d'utilisateurs dans une cellule à N_{\max} . (2.17) impose que la différence entre la puissance reçue en $i \in I$ de son site d'association $j \in J$ et la somme des puissances reçues des autres sites $j' \in J$, moyennant leur facteur d'interférence $B(c, c')$, doit être supérieure ou égale au rapport signal sur bruit SNR_{\min} .

2.2.6 Précisions sur le modèle proposé

Proposition 1 : Une solution optimale de notre modèle ayant comme objectif (2.4) aura un nombre minimal d'AP.

Le coût de déploiement d'un réseau local sans fil est grandement lié au nombre de points d'accès installés. Les WLAN actuels dépassent rarement 50 AP et le coût relatif entre deux AP munis de deux types différents d'antennes est de moins de 2%. Dans ce scénario, notre modèle procure une solution au nombre d'AP minimal et aux antennes de moindre coût, ce qui assure une solution globale de coût minimal.

Proposition 2 : Une solution optimale de notre modèle ayant comme objectif (2.5) aura une répartition équitable du débit parmi l'ensemble des utilisateurs du réseau.

La bande passante d'un AP étant partagée parmi l'ensemble des utilisateurs qui lui sont associés, un plus grand nombre d'utilisateurs dans une cellule implique une diminution du débit disponible par utilisateur. Toute chose étant égale par ailleurs, nous préconisons des solutions où chaque utilisateur a accès au même débit, c'est-à-dire où chaque cellule contient un nombre égal d'utilisateurs. Dans ce cas, FO2 vaudra $N(j)^2$. Sinon, lorsque les utilisateurs ne sont pas répartis uniformément parmi l'ensemble des AP installés, la valeur de (2.5) augmente.

Proposition 3 : Les contraintes d'assignation des points d'accès permettent de déterminer l'ensemble de la carte de couverture du réseau et assurent l'absence de trous de couverture lors de la planification d'un réseau local sans fil.

(2.14) assure que chaque point de demande reçoit la puissance minimale requise pour pouvoir s'associer à un AP. De plus, la contrainte (2.15) permet de connaître à quel AP le point de demande est associé, c'est-à-dire celui duquel il reçoit la plus forte puissance. Ces contraintes sont conformes aux normes du standard IEEE 802.11.

Proposition 4 : La contrainte de débit garantit un débit minimal par utilisateur.

(2.16) se base sur deux approximations : le débit d'association des utilisateurs mobiles avec leur AP et le débit fourni par un AP sont tous deux constants.

Le standard IEEE 802.11b prévoit quatre débits d'association (11, 5.5, 2 et 1 Mbps) qui diminuent en fonction d'une qualité décroissante du lien de communication. Notre réseau se veut équitable : tous les utilisateurs ont droit au débit d'association le

plus élevé possible et les contraintes (2.14) et (2.17) assureront la qualité requise pour obtenir un débit de 11 Mbps à tous les utilisateurs du réseau.

La seconde approximation suppose que le débit fourni par un AP demeure constant. Des travaux récents (voir (Runser, 2005) et (Ling & Yeung, 2005)) ont montré que le débit fourni par un AP à l'ensemble de ses utilisateurs est variable, c'est-à-dire qu'il diminue en fonction d'un nombre croissant d'utilisateurs. Ceci est dû à l'augmentation du trafic de contrôle et de gestion du réseau engendré par un nombre croissant d'utilisateurs. Cependant, nous croyons que notre approximation est valide, surtout lorsque le nombre d'utilisateurs associés à un même AP se situe entre 5 et 30, ce qui est généralement le cas dans les WLAN actuels.

(Ling & Yeung, 2005) évaluent de manière exacte le débit fourni par un AP j à un certain utilisateur i . Ce débit varie en fonction de plusieurs paramètres. Par contre, en considérant les hypothèses courantes suivantes :

- H1 : L'allocation des canaux est de telle sorte que les seuls utilisateurs pouvant empêcher i de transmettre sont ceux contenus dans la même cellule que i .
- H2 : La longueur des paquets transmis est fixe.
- H3 : La probabilité qu'il y ait une collision de paquets ou que le canal soit en attente est négligeable par rapport la probabilité de succès d'une transmission, i.e. le niveau d'interférences dans le réseau est gardé à un niveau acceptable.

Nous pouvons approximer la probabilité de transmission de l'utilisateur i à $N(j)^{-1}$, c'est-à-dire à l'inverse du nombre d'utilisateurs dans la cellule de i , et le débit fourni par un AP j à l'ensemble des utilisateurs de sa cellule correspond alors à la fraction du temps de transmission des données utiles d'un paquet par rapport au temps de transmission de tout le paquet, ce qui est constant.

Ainsi, puisque le lien de communication est partagé parmi tous les utilisateurs d'une même cellule, il suffit de limiter le nombre d'utilisateurs dans une cellule pour assurer un débit minimal à chaque utilisateur du réseau.

Proposition 5 : La contrainte d'interférence assure que le niveau d'interférences en chaque point de demande sera suffisamment faible pour garantir un lien de communication de qualité.

En chaque point de demande, le bruit est fonction de la puissance reçue depuis tous les AP, sauf pour l'AP auquel le point de demande est associé. Nous avons décidé de ne pas considérer le bruit produit par les utilisateurs mobiles de d'autres cellules pour trois raisons :

- Le bruit produit par des utilisateurs mobiles est difficile à évaluer.
- Le bruit produit par des utilisateurs mobiles est, dans la majorité des cas, de bien inférieur au bruit produit par les AP.
- Les utilisateurs mobiles typiques écoutent davantage qu'ils ne transmettent.

(2.17) se base sur les travaux de (Mishra, Rozner, Banerjee & Arbaugh, 2005) (voir section 1.3.2). Ils ont montré analytiquement et expérimentalement que l'utilisation de deux canaux distincts, mais qui se chevauchent, crée des interférences, mais dans une moindre mesure que l'utilisation double du même canal. Le niveau d'interférences créé est pondéré par la distance entre les deux canaux ou encore le degré de chevauchement des canaux.

Ainsi, en chaque point de demande, le niveau de bruit perçu est évalué et comparé à la puissance du signal utile. Un rapport entre ces deux valeurs d'au moins SNR_{min} assure une transmission de qualité.

Proposition 6 : Le problème de planification des réseaux locaux sans fil est NP-difficile.

Le problème de couverture minimale par des ensembles est connu pour être NP-difficile (Garey et Johnson, 1979). Il suffit de montrer que ce problème peut se réduire au problème de planification des WLAN. En effet, l'ensemble des points de demande I devient l'ensemble des éléments et l'ensemble des positions candidates J devient l'ensemble des sous-ensembles. On pose $F(i,j) = P_{\min}$ si l'élément $i \in I$ est dans le sous-ensemble $j \in J$ et $F(i,j) = -\infty$ sinon. Alors, un algorithme qui résout les contraintes de couverture du problème de planification des réseaux locaux sans fil peut résoudre le problème de couverture minimale par des ensembles. Ce dernier étant NP-difficile, on en conclut que le problème de planification des WLAN est NP-difficile. Des heuristiques seront donc préconisées comme méthodes de résolution.

CHAPITRE 3 : APPROCHES DE RÉOLUTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'algorithme élaboré pour résoudre le modèle proposé à la section précédente. Notre approche est principalement basée sur des algorithmes de recherche avec tabous. Nous débutons par une description générale de cette métaheuristique, puis nous exposons comment elle a été adaptée à la résolution de notre problème. Le chapitre se conclut par une vue schématique de l'algorithme développé.

3.1 Description générale de la recherche avec tabous

La recherche avec tabous est une méthode d'optimisation mathématique basée sur des techniques de recherche locale. Elle améliore la performance d'une recherche locale grâce à l'utilisation de structures de mémoire. Elle est attribuée à Fred Glover et Pierre Hansen (Glover, 1990).

La recherche avec tabous utilise une procédure de recherche locale sur un voisinage afin de se déplacer itérativement d'une solution s à une solution s' telle que s' se trouve dans le voisinage de s . À chaque itération, on choisit la solution s' du voisinage de s de manière à minimiser la fonction objectif. Afin d'éviter les pièges des minima locaux, une mémoire à court terme, la liste taboue, est ajoutée à l'algorithme. Celle-ci mémorise des attributs des solutions précédemment visitées durant un certain nombre d'itérations. Il est alors interdit de retourner voir des solutions ayant des attributs contenus dans la liste taboue. La liste taboue possède également un critère d'aspiration. Ce dernier permet de visiter des solutions aux attributs tabous à condition que le coût de telles solutions soit inférieur au coût de la meilleure solution trouvée durant l'ensemble de la recherche. Une recherche avec tabous se caractérise par son espace de recherche, la définition de son voisinage, sa fonction d'évaluation, les éléments et la longueur de sa

liste taboue ainsi que son critère d'arrêt. L'algorithme peut se terminer si une solution optimale est identifiée ou encore après un certain nombre d'itérations. La figure suivante présente l'algorithme de base d'une recherche avec tabous :

- On prend en entrée une solution initiale s_0 , et on définit s^* , la meilleure solution trouvée, $f(s)$, la fonction d'évaluation d'une solution s et T , la liste taboue.
- $s := s_0$
- $s^* := s_0$
- Répéter
 - $m :=$ le meilleur mouvement parmi les mouvements non tabous et les mouvements tabous exceptionnels (critère d'aspiration)
 - $s := s (+) m$
 - Si $f(s) < f(s^*)$, alors $s^* := s$
 - Mettre T à jour
- Jusqu'au critère d'arrêt
- Retourner s^*

Figure 3.1 – Algorithme de base de la recherche avec tabous

3.2 Schéma général de l'algorithme de résolution

Notre algorithme de résolution se divise en deux étapes principales. La première étape vise à obtenir une solution réalisable et fait appel à deux procédures de recherche avec tabous alors que la seconde étape procède à un ajustement local sur la solution réalisable dans le but de l'améliorer par rapport à notre fonction objectif. Cette seconde étape utilise une troisième recherche avec tabous. Ces deux étapes et ces trois recherches avec tabous sont décrites en détail dans les prochaines sections. Voici le schéma général de notre algorithme de résolution :

ÉTAPE 1 : Obtention d'une solution réalisable s à l'aide de deux recherches avec tabous

ÉTAPE 2 : Optimisation à partir s à l'aide d'une recherche avec tabous

Figure 3.2 – Algorithme général de résolution

3.3 Obtention d'une solution réalisable

La première étape de notre algorithme vise à obtenir une solution réalisable, c'est-à-dire une solution qui satisfait toutes les contraintes. Une solution s est formée d'un ensemble d'AP. Chaque AP se caractérise par un site d'installation, une puissance d'émission, une antenne, l'angle d'orientation de l'antenne et un canal de transmission.

3.3.1 Contexte de la procédure de l'obtention d'une solution réalisable

Pour mesurer la qualité d'une solution, une nouvelle fonction, la fonction d'évaluation des contraintes FC, a été définie. $FC(s)$ évalue le degré de violation des contraintes dans une solution s . Son expression est donnée par :

$$FC(s) = FC1(s) + FC2(s) + FC3(s)$$

Chaque terme de FC représente une fonction d'évaluation individuelle basée sur les pénalités d'une des trois contraintes du problème. Nous avons :

- $FC1(s)$ = Nombre de points de demande i dans la solution s dont la puissance maximale reçue est inférieure à P_{\min} . Si $FC1(s) = 0$, alors la contrainte de couverture est satisfaite.
- $FC2(s)$ = Nombre d'utilisateurs en trop associés à chaque AP dans la solution s . $FC2(s) = 0$ implique que la contrainte de débit est satisfaite dans la solution s .
- $FC3(s)$ = Nombre de points de demande i dans la solution s dont le rapport signal sur bruit est inférieur à SNR_{\min} . La contrainte d'interférence est satisfaite si et seulement si $FC3(s) = 0$.

Il est important de noter que les fonctions FC1, FC2 et FC3 sont du même ordre de grandeur pour des exemplaires types du problème de planification des WLAN. C'est pourquoi nous n'avons pas besoin de coefficients de pondération. On remarque aussi que, pour tout s , $FC(s) \geq 0$ et une solution s est réalisable si et seulement si $FC(s) = 0$.

L'objectif de la première phase de notre algorithme est d'obtenir une solution réalisable, c'est-à-dire une solution s telle que $FC(s) = 0$. Pour ce faire, l'algorithme débute avec une solution initiale s_0 . À chaque itération, on effectue une transformation élémentaire, un mouvement, sur la solution courante s pour engendrer une nouvelle solution. L'idée consiste à faire diminuer progressivement la valeur de FC jusqu'à l'obtention d'une solution réalisable.

Le passage d'une solution à une autre utilise deux procédures de recherche avec tabous basés sur deux types de mouvements différents. La première recherche avec tabous, nommée RST-k, effectue des mouvements sur les sites d'installation des AP, les puissances d'émission, les types d'antenne et les angles d'orientation tandis que la seconde recherche, RST-c, effectue des mouvements sur les canaux de transmission. RST-c a pour but de résoudre spécifiquement le problème d'affectation des canaux. Il a été décidé de traiter l'affectation des canaux distinctement des autres paramètres des AP car le choix du canal n'influence pas la puissance transmise et n'a d'impact que sur la contrainte d'interférence. Il faut noter que RST-k et RST-c travaillent avec un nombre fixé d'AP et il faut relancer ces deux procédures pour faire varier le nombre d'AP dans la solution.

3.3.2 Description de la procédure de l'obtention d'une solution réalisable

L'obtention d'une solution réalisable débute par une phase d'initialisation. Il faut d'abord déterminer les valeurs des trois paramètres P_{\min} , N_{\max} et SNR_{\min} . Celles-ci dépendent de la couche physique utilisée dans le protocole de communication ainsi que

de la QoS à garantir dans le WLAN. P_{\min} et SNR_{\min} déterminent le débit d'association des utilisateurs alors que N_{\max} a un impact sur le débit fourni par un AP. Ensuite, on génère une solution initiale d'où débutera la recherche. La contrainte de débit fournit une borne inférieure sur le nombre d'AP à installer dans le réseau. En effet, il faut un nombre minimal d'AP pour couvrir l'ensemble des utilisateurs du réseau si chaque AP ne peut couvrir que N_{\max} utilisateurs. Puisque l'objectif de coût tente de minimiser le nombre d'AP, on débute la recherche avec la borne inférieure du nombre d'AP. Pour chaque AP, on choisit aléatoirement un site, une puissance, une antenne, un angle et un canal.

Une fois l'initialisation terminée, on appelle la recherche RST-k et, à chaque *IterCanaux* itérations de RST-k, la recherche RST-c est lancée. Si RST-k se termine avec une solution réalisable s , on peut alors aller à la seconde étape de notre algorithme : l'optimisation de la solution réalisable. Si, par contre, RST-k se termine sans qu'une solution réalisable n'ait été obtenue, alors on ajoute un autre AP choisi aléatoirement à la solution courante et on relance RST-k. Ainsi, notre algorithme cherche des solutions au nombre d'AP minimal. Si le nombre d'AP dans une solution devient trop important (trois fois la borne inférieure par exemple), c'est probablement que le problème est insoluble et l'algorithme se termine. La figure suivante présente la procédure pour l'obtention d'une solution réalisable :

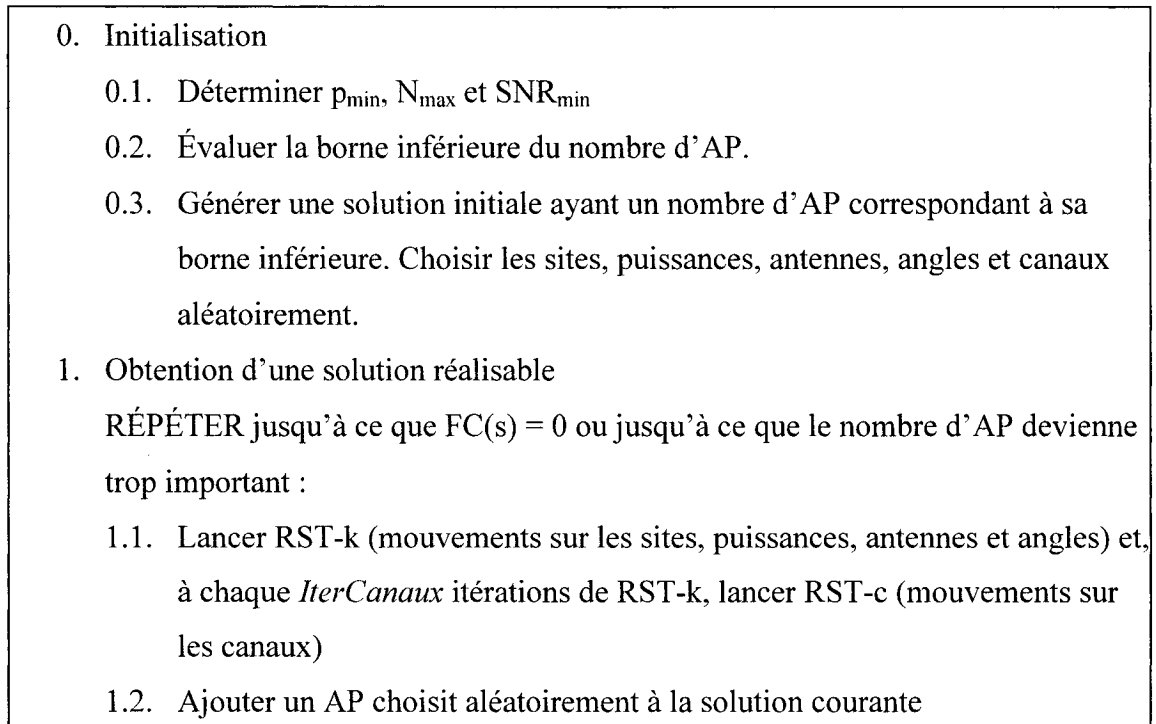


Figure 3.3 – ÉTAPE 1 : Procédure pour l'obtention d'une solution réalisable

3.3.3 Procédure RST-k : Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les configurations

3.3.3.1 Espace de recherche

RST-k, la Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les configurations, effectue des mouvements sur les sites d'installation des AP, les puissances d'émission, les types d'antenne et les angles d'orientation. Nous avons ainsi décidé de définir l'ensemble K , l'ensemble des configurations possibles d'un point d'accès. Un élément $k \in K$ est un quadruplet formé d'une combinaison (j, p, a, θ) . Toutes les combinaisons (j, p, a, θ) sont permises et la taille de K est $|J| |P| |A| |\Theta|$. Ainsi, une solution s qui ne tient pas compte des canaux est formée en prenant n'importe quel sous-ensemble de K . Pour tenir compte des canaux, il faut aussi faire correspondre à chaque élément de s un canal

$c \in C$. Ainsi, une solution du problème correspond à sélectionner la position, la puissance, l'antenne, l'angle et le canal d'un certain nombre de points d'accès. On définit $N_{AP}(s)$, le nombre d'AP installés dans une solution s . Une solution s est ainsi définie par ses vecteurs $k(s)$ et $c(s)$, chacun ayant $N_{AP}(s)$ éléments qui donnent respectivement la configuration et le canal de chaque AP installé.

RST-k travaille sur l'espace de recherche défini uniquement par le vecteur $k(s)$. À chaque itération, on modifie une des $N_{AP}(s)$ configurations de $k(s)$ pour obtenir la solution de l'itération suivante. Le canal de l'AP demeure inchangé. La définition du voisinage d'une solution permet de connaître les modifications permises sur le vecteur $k(s)$ à chaque itération. Pour RST-k, nous avons défini deux voisinages basés sur deux types de mouvements différents : le voisinage standard VS et le voisinage couverture VC. Tel que discuté précédemment, RST-k travaille avec un nombre fixé d'AP tout au cours de la résolution.

3.3.3.2 Voisinage standard VS

Le voisinage standard VS correspond à une extension des voisinages présentés par (Runser, 2005) et (Bahri & Chamberland, 2005). Dans VS, un mouvement sur une solution s s'effectue en modifiant un et un seul élément des $N_{AP}(s)$ configurations du vecteur $k(s)$, ce qui revient à modifier soit la position, soit la puissance, soit l'antenne ou soit l'angle d'un seul des AP installés dans s . Ceci donne $N_{AP}(s) * (|J| + |P| + |A| + |\Theta| - 4)$ mouvements possibles et correspond à la taille de VS. Dans le but d'obtenir une recherche plus efficace, nous avons limité la taille de ce voisinage. La position d'AP peut seulement être modifiée à une position physiquement proche de la position initiale. Aussi, les ensembles P et Θ ont été ordonnés (les puissances en ordre croissant et les angles autour du cercle) et on modifie un élément seulement pour un élément voisin de son ensemble.

3.3.3.3 Voisinage couverture VC

Le second voisinage proposé pour résoudre le problème de planification des WLAN, appelé le voisinage couverture VC, est basé sur la couverture radio d'un AP. Pour une configuration k donnée, la carte de couverture de l'AP est totalement connue à l'aide de la fonction (2.1). Cette fonction, rappelons-le, donne en chaque point de demande la puissance reçue depuis un AP configuré. Les voisins d'une configuration k sont obtenus en comparant les cartes de couverture des autres configurations.

Pour chaque configuration $k \in K$, l'ensemble des points de demande $i \in I$ qui satisfont la contrainte de couverture est comptabilisé. Ensuite, les ensembles ainsi obtenus sont comparés deux à deux entre toutes les paires de configurations. La comparaison est effectuée sur le rapport de l'intersection sur l'union des deux ensembles, ce qui fournit un pourcentage entre chaque paire de configuration. Plus ce pourcentage est élevé, plus les deux configurations d'AP couvrent les mêmes points de demande. On sélectionne alors les N_{VC} meilleurs voisins d'un k pour obtenir les voisins de k et on s'assure que si k_1 est voisin avec k_2 , alors k_2 est voisin avec k_1 . N_{VC} doit être choisi de manière à produire un voisinage connexe, c'est-à-dire qu'il doit exister une suite de mouvements qui permet le passage entre n'importe quelles deux configurations. Un algorithme de parcours de graphe permet de vérifier cette propriété.

Le voisinage couverture d'une solution s , $VC(s)$, correspond dans ce cas-ci à modifier l'un des éléments du vecteur $k(s)$ pour une configuration qui lui est voisine. La taille du voisinage VC (ou le nombre de mouvements permis) est alors de $N_{AP}(s) * N_{VC}$.

L'avantage de ce nouveau voisinage est qu'il permet de voir deux configurations qui ont sensiblement la même carte de couverture comme voisines. Prenons par exemple le cas d'un long corridor qu'il faille couvrir. On peut placer une antenne omnidirectionnelle au centre du corridor, ou encore une antenne directionnelle à l'une ou

l'autre des extrémités du corridor, en obtenant sensiblement les mêmes résultats. VC voit ces trois configurations comme voisines alors que VS nécessiterait plusieurs itérations pour le passage de l'une à l'autre.

3.3.3.4 Fonction d'évaluation

Le but de la recherche RST-k est, rappelons-le, d'obtenir une solution réalisable. Ainsi, RST-k utilise comme fonction d'évaluation la fonction FC pour tenter d'obtenir une solution réalisable.

3.3.3.5 Liste taboue

Pour permettre à la recherche de sortir de minima locaux, une mémoire à court terme est utilisée par notre algorithme. Il s'agit de la liste taboue. Elle mémorise les attributs de solutions précédemment visitées et interdit de la recherche de visiter à nouveau des solutions ayant ces attributs. Pour RST-k, on mémorise dans la liste taboue les configurations k qui sortent d'une solution. Si la configuration $k_n(s)$ de la solution s est remplacée par la configuration $k_n(s')$ dans la solution s' ($1 \leq n \leq N_{AP}(s)$), alors $k_n(s)$ est placé dans la liste taboue pour un nombre aléatoire d'itérations choisi dans l'intervalle $[L_k, U_k]$. L_k et U_k sont deux paramètres de RST-k.

3.3.3.6 Critère d'arrêt

La recherche RST-k se termine évidemment lorsqu'une solution réalisable a été obtenue, c'est-à-dire lorsque $FC(s) = 0$. Cependant, il se peut aussi que l'exemplaire du problème traité soit insoluble et ne possède aucune solution réalisable. C'est pourquoi notre algorithme se termine également lorsque *MaxIter1* itérations sans amélioration de la meilleure solution auront été effectuées. On se souviendra cependant que RST-k travaille avec un nombre fixé d'AP. En modifiant le nombre d'AP dans la solution et en

reprenant RST-k, on espère obtenir une solution réalisable. Le schéma suivant présente le pseudo-code de la procédure RST-k :

- Déterminer le voisinage à utiliser (VS ou VC)
- Pour *MaxIter1* itérations sans amélioration de la meilleure solution :
 1. Parcourir le voisinage à la recherche du mouvement qui minimise FC parmi les mouvements non tabous et les mouvements tabous exceptionnels (critère d'aspiration)
 2. Effectuer le mouvement sélectionné, mettre à jour, au besoin, la meilleure solution trouvée et rendre tabou l'ancienne configuration k
 3. Si l'itération en cours est divisible par *IterCanaux*, lancer RST-c
 4. Si $FC(\text{solution courante}) = 0$, alors FIN

Figure 3.4 – RST-k : Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les configurations

3.3.4 Procédure RST-c : Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les canaux

La première étape de notre algorithme de résolution consiste à obtenir une solution réalisable. Elle utilise deux algorithmes de recherche avec tabous : RST-k et RST-c. RST-c résout le problème d'affectation des canaux. Cette recherche est appelée à chaque *IterCanaux* itérations de la recherche RST-k.

RST-c modifie les canaux des AP d'une solution dans le but de satisfaire la contrainte d'interférences. Les mouvements permis sur une solution consistent à modifier le canal d'un seul AP pour n'importe quel autre canal $c \in C$. On cherche, à chaque itération, le mouvement non tabou sur l'AP qui permettra de minimiser FC. On remarque cependant que le changement d'un canal n'a d'impact que sur la composante FC3 de FC et il est donc inutile de réévaluer les composantes FC1 et FC2 à chaque itération de RST-c.

La structure de la liste taboue est quelque peu différente pour RST-c que pour RST-k. Une solution ne peut contenir deux fois la même configuration k simplement parce qu'un site $j \in J$ ne peut accueillir deux AP (voir contraintes d'unicité des paramètres). Cependant, le nombre de canaux disponibles étant limité, une solution doit être en mesure de réutiliser des canaux de communication. Ainsi, lorsque le canal d'un AP est modifié, on interdit à cet AP spécifique de reprendre le même canal durant un certain nombre d'itérations. Plus formellement, c'est le couple (indice de l'AP, canal sortant) qui est mis tabou. Ainsi, si le canal $c_n(s)$ de la solution s est changée pour le canal $c_n(s')$ dans la solution s' ($1 \leq n \leq N_{AP}(s)$), alors $(n, c_n(s))$ est placé dans la liste taboue pour un nombre aléatoire d'itérations choisi dans l'intervalle $[L_c, U_c]$. L_c et U_c sont deux paramètres de RST-c. On remarque qu'un même canal peut être attribué à plusieurs AP dans une solution donnée.

Les critères d'arrêt de RST-c sont similaires à RST-k. RST-c se termine lorsque $FC3(s) = 0$ ou encore lorsque *MaxIterCanaux* itérations ont été effectuées sans amélioration de la meilleure solution par rapport à FC3. Le schéma suivant présente RST-c, la Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les canaux :

- Pour *MaxIterCanaux* itérations sans amélioration de la meilleure solution, faire :
 1. Pour chaque AP, parcourir chaque canal $c \in C$ à la recherche du canal qui minimise FC3 parmi les mouvements non tabous et les mouvements tabous exceptionnels (critère d'aspiration)
 2. Effectuer le mouvement sélectionné, mettre à jour, au besoin, la meilleure solution trouvée et rendre tabou l'ancien couple $(n, c_n(s))$
 3. Si $FC3(\text{solution courante}) = 0$, alors FIN

Figure 3.5 – RST-c : Recherche de Satisfiabilité avec Tabous sur les canaux

3.4 Optimisation de la solution réalisable

Pour le moment, notre algorithme de résolution s'est contenté de trouver des solutions réalisables sans évaluer les solutions obtenues par rapport à l'objectif du problème. La seconde et dernière étape de notre algorithme de résolution vise justement à optimiser la solution réalisable obtenue à l'étape précédente par rapport à l'objectif du problème. Pour ce faire, elle demeure dans l'espace des solutions réalisables et effectue des mouvements incrémentaux sur une solution réalisable dans le but de progressivement améliorer $FO(s)$, la fonction objectif de notre modèle.

La deuxième étape de notre algorithme de résolution utilise ROT-k, la Recherche d'Optimalité avec Tabous sur les configurations, dont les caractéristiques sont fortement similaires à RST-k. L'espace de recherche, le voisinage et la structure de la liste taboue sont les mêmes. Cependant, ROT-k utilise comme fonction d'évaluation notre fonction objectif FO . Aussi, le critère d'arrêt de ROT-k diffère de celui de RST-k puisque, dans ROT-k, nous n'avons aucun moyen de savoir si une solution est optimale. Finalement, on impose que ROT-k demeure dans l'ensemble des solutions réalisables, c'est-à-dire que tous les mouvements m effectués sur la solution s par ROT-k sont tels que $FC(s (+) m) = 0$. Voici le schéma de la deuxième étape de notre algorithme de résolution :

À partir d'une solution réalisable s , lancer ROT-k

Figure 3.6 – ÉTAPE 2 : Procédure pour optimiser une solution réalisable

3.4.1 ROT-k : Recherche d'Optimalité avec Tabous sur les configurations

La fonction d'évaluation pour ROT-k est (2.6), la fonction objectif du modèle défini au chapitre précédent. On rappelle que :

$$FO = \alpha FO_1 + (1 - \alpha) FO_2 \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$$

Avec FO1, la fonction objectif de coût, et FO2, la fonction objectif de débit. Le paramètre α permet de régler l'importance accordée à chacun de deux objectifs. ROT-k se termine lorsque *MaxIter2* itérations ont été effectués sans amélioration de la meilleure solution. Voici le schéma de ROT-k, la Recherche d'Optimalité avec Tabous sur les configurations :

- Déterminer le voisinage à utiliser (VS ou VC)
- Pour *MaxIter2* itérations sans amélioration de la meilleure solution, faire :
 1. Parcourir le voisinage à la recherche du mouvement qui minimise FO parmi les mouvements non tabous et les mouvements tabous exceptionnels (critère d'aspiration) tout en demeurant dans l'ensemble des solutions admissibles FC(s) = 0.
 2. Effectuer le mouvement sélectionné, mettre à jour, au besoin, la meilleure solution trouvée et rendre tabou l'ancienne configuration k

Figure 3.7 – ROT-k : Recherche d'Optimalité avec Tabous sur les configurations

3.5 Résumé de l'algorithme de résolution

3.5.1 Caractéristiques des recherches avec tabous

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques des trois recherches avec tabous utilisées par notre algorithme de résolution pour résoudre le problème de planification des réseaux locaux sans fil :

Tableau 3.1 – Caractéristiques des recherches avec tabous employées

	Étape 1		Étape 2
Recherche avec tabous	RST-k	RST-c	ROT-k
Solution dans l'espace de recherche	Ensemble de N_{AP} configurations	Ensemble de N_{AP} canaux	Ensemble s de N_{AP} k et c tel que $FC(s) = 0$
Voisinage	VS ou VC	C	VS ou VC
Fonction d'évaluation	FC	FC3	FO
Structure de la liste Taboue	k sortant	(n,c) sortant	k sortant
Longueur de la liste	$[L_k, U_k]$	$[L_k, U_k]$	$[L_k, U_k]$
Critère d'arrêt	$FC = 0$ ou $MaxIter1$	$FC3 = 0$ ou $MaxIterCanaux$	$MaxIter2$

3.5.2 Schéma général de l'algorithme de résolution

Le schéma suivant présente globalement l'algorithme de résolution développé pour résoudre le problème de planification des réseaux locaux sans fil :

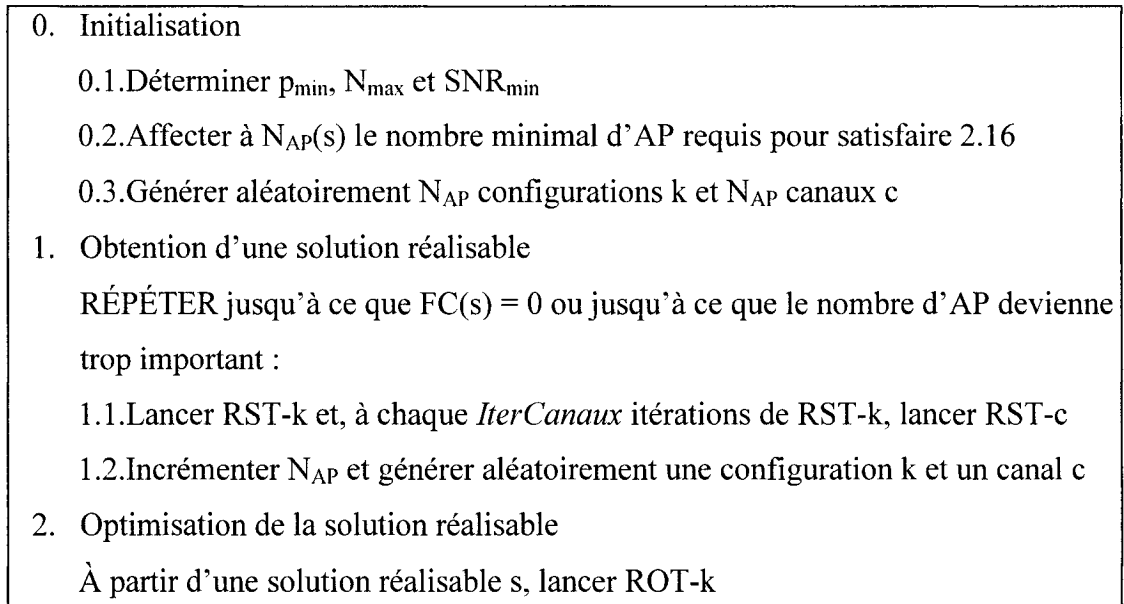


Figure 3.8 – Algorithme complet de résolution

Le chapitre suivant présente les détails de l'implémentation de notre algorithme, ainsi que les résultats obtenus pour différentes instances du problème.

3.5.3 Logiciel utilisé pour résoudre le problème de planification des WLAN

La figure suivante présente une vue complète du logiciel qui implémente notre algorithme de résolution. On y voit les entrées, les pré-traitements, notre algorithme de résolution ainsi que les sorties du logiciel.

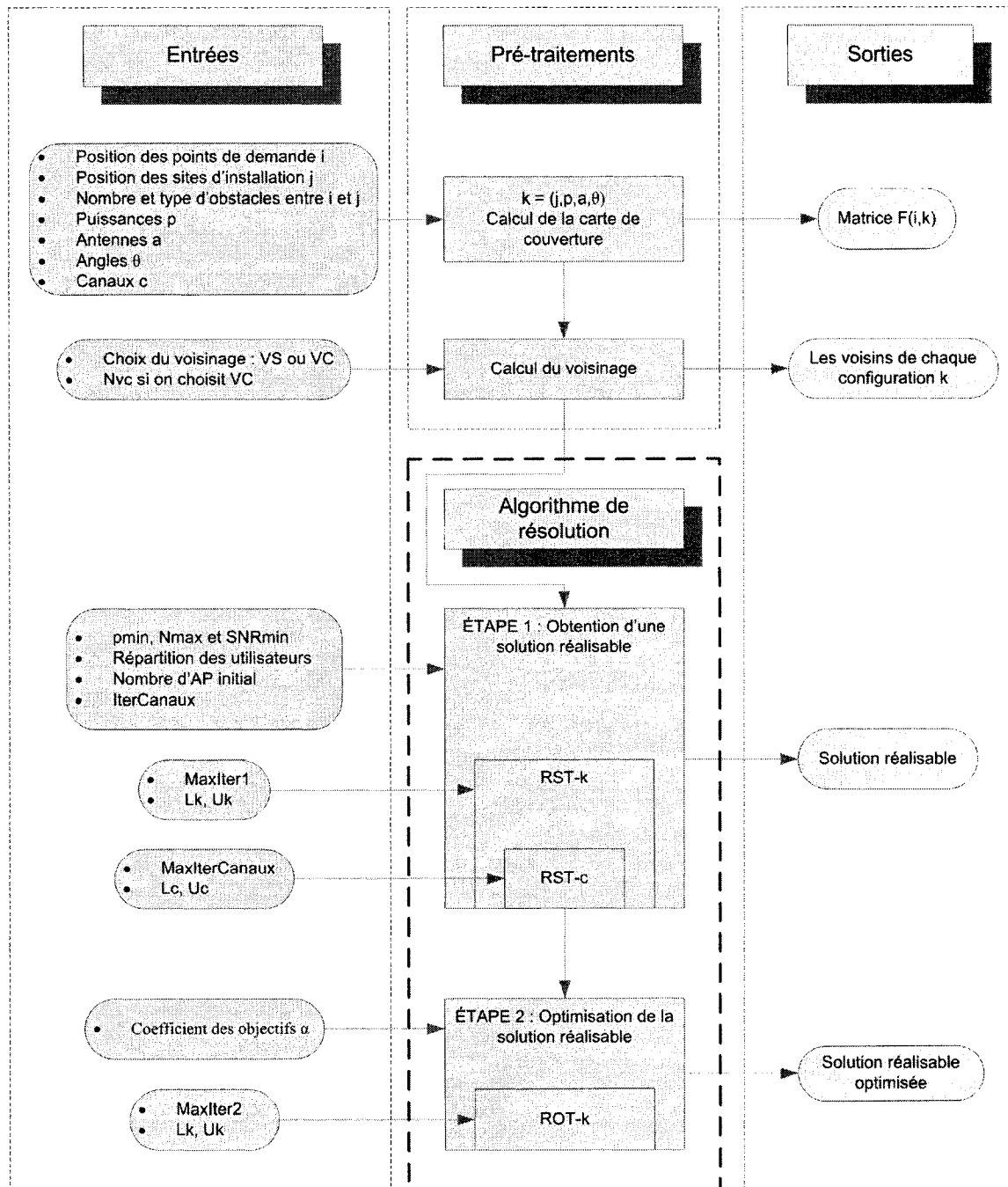


Figure 3.9 – Logiciel utilisé pour résoudre le problème de planification des WLAN

3.6 Discussion et variantes d'approches de résolution

Dans cette section, nous présentons quelques remarques et variantes possibles de notre algorithme de résolution et discutons des interventions du planificateur de réseau dans le but d'améliorer l'efficacité de la méthode.

Premièrement, il est important de noter que notre algorithme de résolution ne fournit pas à chaque exécution une solution réalisable. Il y a deux raisons à cela. D'abord, notre algorithme de résolution est une heuristique et, à ce titre, il n'y a aucune garantie sur la convergence des solutions. Plusieurs relances peuvent être nécessaires pour obtenir une solution réalisable. Ensuite, il se peut que l'exemplaire du problème traité soit d'emblée insoluble. Ceci se produit lorsque, par exemple, on désire desservir un trop grand nombre d'utilisateurs à un débit trop important et que la technologie disponible ne le permet pas. Si plusieurs relances de l'algorithme ne fournissent toujours pas de solutions réalisables, il faudrait dans ce cas peut-être revoir les valeurs accordées aux trois paramètres P_{\min} , N_{\max} et SNR_{\min} . On peut, par exemple, diminuer le débit d'association des utilisateurs ou encore modifier le protocole utilisé pour la couche physique du réseau et relancer l'algorithme de résolution depuis le début. On pourra ainsi espérer obtenir une solution réalisable, mais au coût d'une QoS moindre. Une autre option qui s'offre au planificateur de réseau serait de considérer des solutions non réalisables comme solution finale. Tout dépend de l'importance accordée aux contraintes et de leur degré de violation. La contrainte de débit pourrait être relâchée ou encore perçue comme un objectif à optimiser.

Deuxièmement, étant donné notre objectif de coût, on désire obtenir une solution réalisable ayant un nombre d'AP minimal. C'est pourquoi la première étape de notre algorithme s'inscrit dans une boucle où le nombre d'AP augmente progressivement et s'arrête dès l'obtention d'une solution réalisable. Puisque l'heuristique RST-k n'offre aucune garantie quant à la convergence des solutions, il pourrait être intéressant

d'augmenter la valeur du paramètre *MaxIter1* et de relancer RST-k avec un AP de moins que la solution réalisable obtenue. Ainsi, en étant plus patient avec la recherche, les probabilités d'obtenir une solution réalisable ayant un nombre d'AP minimal augmentent.

Troisièmement, nous croyons que la seconde étape de notre algorithme n'améliorera que de très peu la valeur de l'objectif de la solution. Tel que discuté précédemment, la composante de coût de l'objectif dépend bien plus du nombre d'AP installés que du type d'antennes installées. L'optimisation d'une solution réalisable se fait sur un nombre fixé d'AP. Ainsi, les seules améliorations possibles au niveau du coût se produisent lorsque l'antenne d'un AP est modifiée pour une antenne moins coûteuse, ce qui produit une variation marginale de la valeur de l'objectif. Aussi, dans le cas où le nombre d'AP de la solution réalisable obtenue est proche de la borne inférieure du nombre d'AP, la composante de débit de l'objectif ne pourra, elle non plus, diminuer de beaucoup. En effet, dans ce cas, le nombre d'utilisateurs par cellule tend vers N_{\max} et le réseau est déjà bien équilibré. On peut donc dire que notre approche de résolution produit des solutions réalisables qui sont d'emblée très proches des solutions optimales de notre modèle.

Quatrièmement, on peut supposer que ROT-k ne dispose que d'un nombre très réduit de mouvements pour demeurer dans l'espace des solutions réalisables. Dans ce cas, la recherche perd grandement de son efficacité. Pour remédier à ce problème, il serait envisageable de travailler avec des versions étendues des voisinages VS et VC. Pour VS, on ne réduit plus le voisinage tel que nous l'avons décrit précédemment et, pour VC, on augmente la valeur de N_{VC} . Aussi, il pourrait s'avérer qu'un voisinage soit plus efficace que l'autre dans certaines parties de la recherche et rien n'impose au logiciel de travailler tout le temps avec le même voisinage au cours d'une exécution.

Cinquièmement, pour améliorer la performance et la rapidité d'exécutions de notre algorithme, il pourrait être intéressant de débiter la recherche avec des configurations d'AP choisies de manière pseudo-aléatoire. En effet, dans le cas d'un environnement de déploiement s'apparentant à une tour à bureau, une solution initiale pourrait répartir uniformément les AP dans l'espace : on choisit aléatoirement un AP par étage par exemple, et les autres au hasard. On peut faire de même lors de l'ajout d'un AP à une solution existante : ajouter un AP qui assure de couvrir des points de demande non couverts. (Bahri & Chamberland, 2005) ont défini une heuristique d'initialisation, IH-PA, pour générer une solution initiale qui alimentera leur recherche avec tabous. Cependant, nous croyons que cette heuristique n'est pas suffisamment aléatoire et qu'elle empêcherait, même avec plusieurs relances, de visiter certaines sections de l'espace des solutions.

Sixièmement, il peut être intéressant de reprendre la deuxième étape de l'algorithme de résolution depuis la même solution réalisable obtenue à la première étape pour différentes valeurs de α . Ceci permet d'obtenir un ensemble de solutions dites optimisées et le planificateur de réseau peut choisir la solution qui lui convient le mieux. Aussi, à cette seconde étape de l'algorithme, une approche multi-objective pourrait être employée dans le but d'obtenir le front de Pareto des solutions réalisables.

Septièmement, nous n'avons pour le moment rien mentionné sur l'évaluation de FC et de FO à chaque itération de notre algorithme. À ce niveau, nous avons utilisé des structures de données qui permettent un calcul incrémental de ces deux fonctions à chaque mouvement effectué. Cependant, lors du parcours du voisinage à la recherche du meilleur mouvement, notre algorithme doit effectuer le mouvement pour être en mesure d'en évaluer la qualité. Nous n'avons pas trouvé de structures de données permettant de connaître efficacement à l'avance l'impact d'un mouvement sur une solution. Aussi, nous n'avons pas utilisé de liste de candidats pour déterminer, dans le voisinage d'une solution, les mouvements qui potentiellement permettraient de rendre une contrainte non

violée. Au premier regard, ces deux approches posent de trop nombreuses difficultés et devraient faire l'objet d'une recherche approfondie.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET ANALYSE

Dans ce chapitre, nous présentons les détails d'implémentation de notre algorithme de résolution, les valeurs numériques utilisées pour nos tests, les résultats expérimentaux obtenus ainsi que nos analyses et conclusions quant à l'utilisation d'un logiciel qui implémente notre algorithme de résolution.

4.1 Données de simulation

4.1.1 Couche physique et débit d'association : P_{\min} et SNR_{\min}

Les tableaux suivants présentent les valeurs à donner par le planificateur de réseau à P_{\min} et à SNR_{\min} en fonction du protocole de la couche physique du réseau et du débit d'association des utilisateurs (source www.cisco.com) :

Tableau 4.1 – Données de simulation pour le standard 802.11a

Débit d'association (Mbps)	P_{\min} (dBm)	SNR_{\min} (dBm)
54	-72	50
48	-73	
36	-78	36
24	-81	24
18	-84	
12	-85	22
9	-87	
6	-87	17

Tableau 4.2 – Données de simulation pour le standard 802.11b

Débit d'association (Mbps)	P_{\min} (dBm)	SNR_{\min} (dBm)
11	-85	22
5,5	-89	17
2	-91	13
1	-94	10

Tableau 4.3 – Données de simulation pour le standard 802.11g

Débit d'association (Mbps)	P_{\min} (dBm)	SNR_{\min} (dBm)
54	-72	50
48	-72	
36	-73	36
24	-77	24
18	-80	
12	-82	22
9	-84	
6	-90	17

Le standard 802.11b est, au moment de la publication de ce mémoire, le standard le plus largement répandu pour le déploiement d'un réseau local sans fil. Nous avons donc effectué nos simulations avec ce standard, bien que les standards 802.11a ou 802.11g auraient également pu être utilisés. De plus, voulant offrir le meilleur service aux utilisateurs, nous avons effectué nos simulations en prenant un débit d'association maximal de 11 Mbps. Ainsi, nos simulations ont été effectuées avec $P_{\min} = -85$ et $SNR_{\min} = 22$. Cependant, lorsqu'aucune solution réalisable n'a pu être obtenue avec ces valeurs, nous avons relancé notre algorithme en prenant un débit d'association inférieur.

4.1.2 Garantie de débit par utilisateur : N_{\max}

Tel que discuté précédemment, c'est en limitant le nombre d'utilisateurs par cellule que nous sommes en mesure de garantir un débit utile à chaque utilisateur du

réseau. Cisco prévoit que, pour un débit d'association de 11 Mbps, le débit fourni par un AP sera d'environ 5 Mbps. Le reste du débit est utilisé pour les entêtes et la gestion du trafic sur le réseau. Cette valeur coïncide, à quelques kbps près, aux valeurs que l'on retrouve dans la littérature (voir (Ling & Yeung, 2005) et (Runser, 2005)). Pour nos simulations, nous avons considéré que chaque utilisateur devait disposer d'un débit utile de 250 kbps, ce qui fait que N_{\max} , le nombre maximal d'utilisateurs par cellule, égal 20.

4.1.3 Environnements de déploiement

Nous avons testé notre algorithme sur trois différents environnements de déploiement que nous avons fabriqués. La disposition des murs, le nombre d'étages ainsi que le nombre d'usagers ont été choisis de manière à créer des difficultés différentes et croissantes dans les trois environnements testés. Ces environnements de déploiement ont servis à pré-calculer la carte de couverture, soit la matrice des $F(i,j)$. Leurs détails sont présentés ci-dessous.

4.1.3.1 EA : l'Environnement A

Le premier environnement de déploiement sur lequel nous avons testé notre algorithme se nomme EA. Il s'agit d'un bâtiment de deux étages dont la disposition des murs, des points de demande et des sites d'installation des AP d'un étage est donnée par la figure suivante :

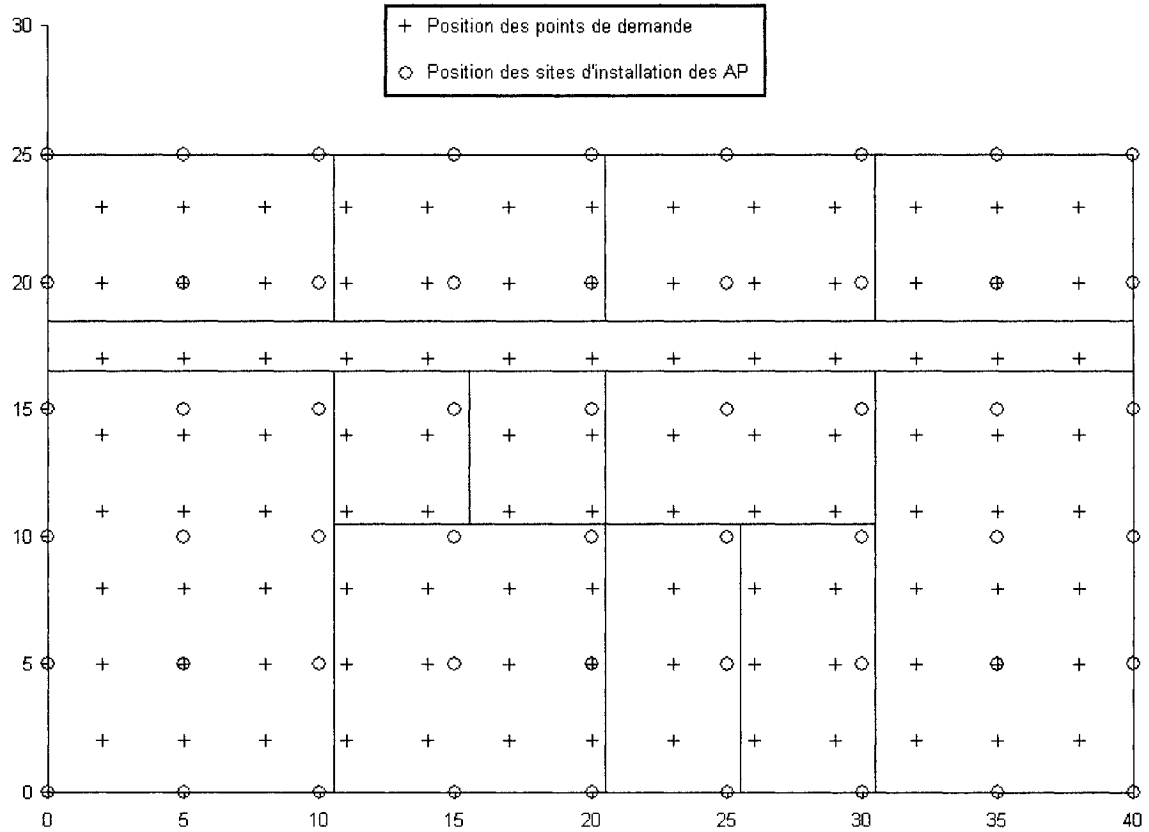


Figure 4.1 – Disposition des murs, des points de demande et des sites d'installation des AP sur un étage de EA

Les deux étages du bâtiment sont identiques. La superficie totale à couvrir est de 2000 m^2 . EA ne considère que deux types d'obstacles : les murs et les planchers/plafonds. Il contient 80 utilisateurs répartis aléatoirement en 208 points de demande et 108 sites sont considérés pour l'installation des AP. Avec $N_{\max} = 20$, on remarque que la borne inférieure sur le nombre d'AP vaut $4 \left(\left\lceil \frac{80}{20} \right\rceil \right)$.

4.1.3.2 EB : l'Environnement B

Le second environnement de déploiement sur lequel nous avons testé notre algorithme se nomme EB. Il s'agit d'un bâtiment d'un seul étage dont la disposition des points de demande et des sites d'installation des AP est donnée par la figure suivante :

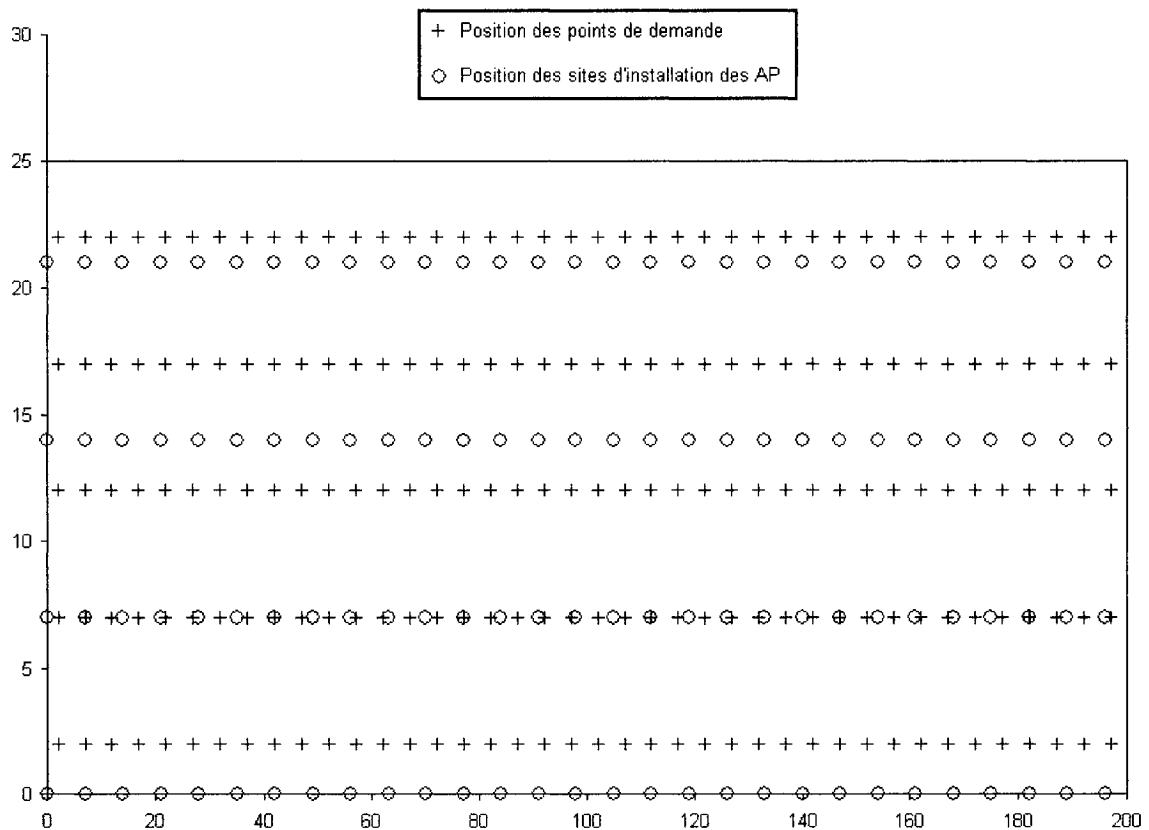


Figure 4.2 – Disposition des points de demande et des sites d'installation des AP pour EB

On remarque que cet environnement de déploiement s'apparente à un terminal d'aéroport. La superficie totale à couvrir est de 5000 m^2 . EB ne considère aucun obstacle lors de l'évaluation de la carte de couverture. Il contient 150 utilisateurs répartis

aléatoirement en 200 points de demande et 116 sites sont considérés pour l'installation des AP. Avec $N_{\max} = 20$, la borne inférieure sur le nombre d'AP vaut $8 \left(\left\lceil \frac{150}{20} \right\rceil \right)$.

4.1.3.3 EC : l'Environnement C

Le troisième environnement de déploiement sur lequel nous avons testé notre algorithme se nomme EC. Il s'agit d'un bâtiment de huit étages dont la disposition des murs, des points de demande et des sites d'installation des AP d'un étage est donnée par la figure suivante :

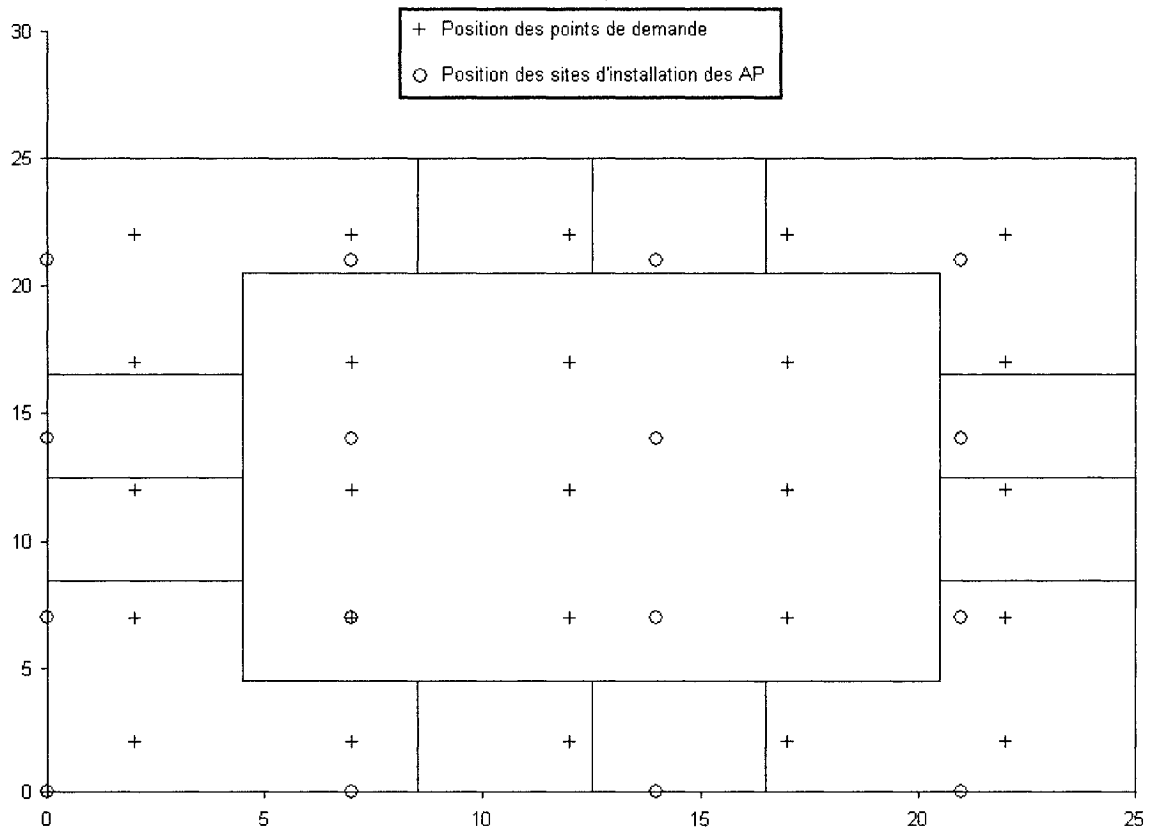


Figure 4.3 – Disposition des murs, des points de demande et des sites d'installation des AP sur un étage de EC

Les huit étages du bâtiment sont identiques. La superficie totale à couvrir est de 5000 m². EC ne considère que deux types d'obstacles : les murs et les planchers/plafonds. Il contient 200 utilisateurs répartis aléatoirement en 200 points de demande et 118 sites seront considérés pour l'installation des AP. Ce type d'environnement de déploiement s'apparente à une tour à bureaux. Avec $N_{\max} = 20$, la borne inférieure sur le nombre d'AP vaut $10 \left(\left\lceil \frac{200}{20} \right\rceil \right)$.

Le tableau suivant reprend les caractéristiques des trois environnements de déploiement sur lesquels nos tests ont été effectués :

Tableau 4.4 – Caractéristiques des environnements de déploiement testés

Environnement de déploiement	EA	EB	EC
Superficie (m²)	2000	5000	5000
Nombre d'étages	2	1	8
Nombre d'utilisateurs	80	150	200
Nombre de points de demande	208	200	200
Nombre de sites d'installation des AP	108	116	118
Borne inférieure sur le nombre d'AP	4	8	10
Bâtiment type	-	Aéroport	Tour à bureau

4.1.4 Autres données de simulation

Pour l'ensemble des puissances de transmission, nous nous sommes référés à la suite de points d'accès Aironet 1200 de Cisco. Les puissances de transmission permises pour nos tests sont : 1, 5, 20, 30, 50 et 100 mW.

Nous avons considéré trois types différents d'antennes : une antenne omnidirectionnelle de gain de 2 dBi et deux antennes directionnelles de gain de 6 et 8.5 dBi. Leurs caractéristiques sont présentées dans l'annexe A. Dans notre simulation, nous avons supposé que le coût des AP équipés de ces trois antennes est respectivement de 1000, 1010 et 1020.

Pour chaque antenne et pour chaque site d'installation des AP, nous avons considéré qu'un AP pouvait prendre un angle choisi dans l'ensemble suivant : 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 et 315 degrés.

Aussi, comme dit précédemment, nous avons choisi le protocole 802.11b pour la couche physique du réseau. Nous disposons ainsi de 11 canaux de communications. Le tableau suivant présente la fréquence centrale de ces 11 canaux :

Tableau 4.5 – Fréquence centrale des canaux 802.11b

Canal	Fréquence (MHz)
1	2 412
2	2 417
3	2 422
4	2 427
5	2 432
6	2 437
7	2 442
8	2 447
9	2 452
10	2 457
11	2 462

Les canaux 1, 6 et 11 ne se chevauchent pas. Pour être en mesure d'affecter les 11 canaux, nous avons défini dans notre modèle le facteur d'interférence B qui mesure le degré de chevauchement entre deux canaux. Nous avons ici procédé à une simplification

de B en supposant qu'il était seulement fonction de la distance entre deux canaux. Le tableau suivant présente les valeurs que nous avons utilisées pour nos tests. Elles ont été tirées de (Mishra, Rozner, Banerjee & Arbaugh, 2005).

Tableau 4.6 – Facteur d'interférence B en fonction de la distance entre le canal utile et le canal nuisible

Distance entre deux canaux	B
...	0
-5	0
-4	0,22
-3	0,60
-2	0,72
-1	0,77
0	1
1	0,96
2	0,77
3	0,66
4	0,39
5	0
...	0

Finalement, nous avons donné un coefficient d'atténuation de 5dB aux murs et de 20 dB aux plafonds/planchers de nos environnements de déploiement. Il s'agit de valeurs typiques trouvées dans la littérature.

4.2 Paramétrage de notre algorithme de recherche

L'algorithme de résolution a été codé dans le langage de programmation C++. Les simulations ont été effectuées sur le système d'exploitation Windows XP doté du Service Pack 2. La machine de simulation avait une mémoire vive de 512 MB et un processeur Intel Pentium M de 1.60 MHz.

Quelques tests préliminaires nous ont permis d'ajuster les différents paramètres des procédures de notre algorithme de résolution. Les valeurs numériques que nous avons utilisées pour nos simulations sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.7 – Valeurs numériques des paramètres de notre algorithme de résolution

Procédure	Paramètre	Valeur utilisée
Pré-traitement	N_{VC}	50
Étape 1	IterCanaux	5
RST-k	MaxIter1	300
	$[L_k, U_k]$	[10,25]
RST-c	MaxIterCanaux	10
	$[L_c, U_c]$	[5,15]
ROT-k	MaxIter2	100
	$[L_k, U_k]$	[10,25]

4.3 Résultats et analyse

4.3.1 Temps de calculs des pré-traitements

Afin d'optimiser le temps de calcul et de permettre d'effectuer rapidement plusieurs relances pour un même test, nous avons pré-calculé la carte de couverture, le voisinage standard et le voisinage couverture des trois environnements de déploiement. Le tableau suivant donne les temps de calcul obtenus :

Tableau 4.8 – Temps de calculs, en secondes, des pré-traitements

Environnement de déploiement	Carte de couverture $F(i,k)$	Voisinage standard	Voisinage couverture
EA	105	44	1956
EB	87	53	6840
EC	103	63	3806

On observe que les temps de calcul de la carte de couverture sont sensiblement identiques pour les trois problèmes traités, bien que le calcul pour EB se soit fait un peu plus rapidement. Ceci peut être expliqué par l'absence d'obstacles dans EB. Le temps de calcul de VS augmente de EA à EB, puis de EB à EC, étant donné que ces trois problèmes ont un nombre croissant de sites d'installation. Finalement, pour VC, on remarque que le temps de calculs explose pour EB. Ceci peut encore une fois être expliqué par l'absence d'obstacles dans EB, ce qui rend les configurations beaucoup plus similaires entre elles.

4.3.2 Obtention de solutions réalisables

Cette section présente nos résultats et analyse quant à la capacité de notre algorithme à produire des solutions réalisables. Nos tests ont été effectués en lançant la première partie de notre algorithme pour chacun de nos trois environnements de déploiement. Cependant, puisque notre algorithme est une heuristique et qu'il n'y a aucune garantie quant à l'obtention d'une solution réalisable à chaque exécution, nous avons effectué 30 relances de la procédure RST-k. Si, après 30 relances, aucune solution réalisable n'avait pu être obtenue, alors, comme le décrit l'algorithme, nous avons incrémenté le nombre d'AP et relancé RST-k 30 autres fois. Ainsi, nous étions en mesure de trouver, avec suffisamment de confiance, le nombre minimal d'AP requis pour obtenir une solution réalisable dans les trois environnements de déploiement. Aussi, si aucune solution réalisable ne pouvait être obtenue, quel que soit le nombre d'AP, nous avons relancé nos tests en diminuant le débit d'association des utilisateurs. La performance de notre algorithme a été évaluée en fonction de trois critères différents : le choix du voisinage, les types d'antennes utilisées et les canaux disponibles.

4.3.2.1 Choix du voisinage

Le tableau 4.9 présente le nombre de solutions réalisables obtenues en fonction du choix du voisinage pour nos trois environnements de déploiement. On y observe le nombre d'AP des solutions réalisables obtenues ainsi que le débit d'association garanti aux utilisateurs. Tout nombre d'AP inférieur à ce qui est inscrit dans le tableau n'a pas été en mesure de produire des solutions réalisables. EA a mis 1823 secondes avant de trouver une première solution réalisable avec VS (30 relances avec 4 AP à 11 Mbps), EB en aura mis 26 361 (30 relances avec 8, 9, 10 et 11 AP à 11 Mbps) et EC en aura mis environ 147 000 (30 relances avec 10, 11, 12, 13 et 14 AP à 11 Mbps et avec 10 et 11 AP à 5.5 Mbps). Le temps de calcul moyen pour obtenir une solution réalisable correspond au temps total des 30 relances de RST-k avec le nombre d'AP et le débit d'association des solutions réalisables divisé par le nombre de solutions réalisables obtenues. Il en va de même pour le nombre d'itérations moyen pour une obtenir une solution réalisable.

Tableau 4.9 – Obtention de solutions réalisables en fonction du voisinage pour nos trois environnements de déploiement

Environnement de déploiement	EA		EB		EC	
Voisinage	VS	VC	VS	VC	VS	VC
Nombre d'AP	5	5	8	8	12	12
Débit d'association (Mbps)	11	11	5.5	5.5	5.5	5.5
Temps de calcul moyen pour obtenir une solution réalisable (sec)	21.95	52.85	137.8	270.6	815.2	1179
Nombre d'itérations moyen pour obtenir une solution réalisable	128.2	104.7	569.9	399.4	2227	1028
Nombre de solutions réalisables obtenues	28 (93%)	29 (97%)	19 (77%)	25 (83%)	12 (40%)	15 (50%)

On observe d'abord que les deux voisinages ont produit des solutions réalisables ayant le même nombre d'AP et le même débit d'association pour nos trois environnements de déploiement. En effet, pour EA, aucun des deux voisinages n'a produit de solutions réalisables avec 4 AP, la borne inférieure sur le nombre d'AP dans EA. Par contre, VS et VC ont produits respectivement 28 et 29 solutions réalisables avec 5 AP et ce, au meilleur débit d'association offert par le standard 802.11b. Pour EB, quel que soit le voisinage utilisé, nous n'avons pas été en mesure d'obtenir de solutions réalisables en fixant les valeurs de P_{\min} et SNR_{\min} qui permettent de garantir un débit d'association à 11 Mbps. Cependant, nous avons été en mesure d'obtenir de nombreuses solutions réalisables (19 pour VS et 25 pour VC) utilisant un nombre d'AP correspondant à sa borne inférieure lorsque nous avons diminué le débit d'association des utilisateurs à 5.5 Mbps. Pour EC, il a fallu être encore plus patient. Les solutions réalisables obtenues ont 2 AP de plus que la borne inférieure sur le nombre d'AP (12 par rapport à 10) et le débit d'association a dû être diminué à 5.5 Mbps. Le taux de succès est respectivement de 40% et de 50% pour VS et VC.

Le temps de calcul moyen pour obtenir une solution réalisable a été systématiquement inférieur lorsque nous avons employé le voisinage VS. Pour EA et EB, VS a mis environ la moitié du temps pour fournir une solution réalisable par rapport à VC. Ainsi, on pourrait être amené à conclure que l'utilisation du voisinage VS est plus efficace pour obtenir des solutions réalisables par rapport à l'utilisation de VC. Par contre, VS a nécessité davantage d'itérations pour obtenir une solution réalisable, ce qui nous indique qu'une itération effectuée avec VC est plus efficace qu'une itération effectuée avec VS, mais elle nécessite plus de temps. Nous expliquons ceci par le fait que la taille de VC est beaucoup plus importante que la taille de VS. En effet, une configuration dans VS a, en moyenne, 14 voisins, alors qu'elle en a plus de 60 dans VC. Ainsi, la recherche du meilleur mouvement à chaque itération est beaucoup plus longue avec VC, mais moins d'itérations seront requises pour parcourir la même distance dans l'espace des solutions. En optimisant le calcul du meilleur mouvement dans le voisinage

d'une solution, par exemple en utilisant une liste de candidats au lieu de parcourir tout le voisinage, le voisinage VC pourrait alors donner de meilleurs résultats que VS. Il s'agit là d'une piste intéressante de recherche avant de conclure sur l'efficacité relative de nos deux voisinages. Sur la base de nos travaux, toutefois, nous recommandons l'utilisation du voisinage VS pour l'obtention de solutions réalisables.

4.3.2.2 Types d'antennes utilisées

Notre modèle est, à notre connaissance, le seul qui permet l'utilisation d'antennes directionnelles. Nous avons donc voulu tester la pertinence d'utiliser de telles antennes dans la planification d'un WLAN. Pour ce faire, nous avons effectué les mêmes tests que décrits précédemment, mais seules les antennes omnidirectionnelles étaient permises. Aussi, ces tests ont été effectués avec le voisinage standard seulement. Le tableau suivant présente le nombre de solutions réalisables obtenues en fonction des types d'antennes utilisées. Il faut noter que la ligne correspondant au choix de toutes les antennes a été reprise du tableau précédent.

Tableau 4.10 – Obtention de solutions réalisables avec VS en fonction du type d'antennes pour nos trois environnements de déploiement

Environnement de déploiement	EA		EB		EC	
Type d'antennes	Toutes	Omni	Toutes	Omni	Toutes	Omni
Nombre d'AP	5	5	8	8	12	12
Débit d'association (Mbps)	11	11	5.5	5.5	5.5	5.5
Temps de calcul moyen pour obtenir une solution réalisable (sec)	21.95	45.87	137.8	1132	815.2	1362
Nombre d'itérations moyen pour obtenir une solution réalisable	128.2	295.1	569.9	4133	2227	3453
Nombre de solutions réalisables obtenues	28 (93%)	20 (67%)	19 (77%)	5 (17%)	12 (40%)	5 (17%)

Pour EA, le nombre de solutions réalisables obtenues a été sensiblement inférieur (67 % de taux de succès) à ce qui a été obtenu en utilisant aussi des antennes directionnelles. Aussi, les temps de calculs et le nombre d'itérations requis pour obtenir une solution réalisable ont plus que doublé. Cependant, le nombre d'AP requis et le débit d'association sont les mêmes, quels que soient les types des antennes utilisées. Ainsi, pour EA, l'utilisation d'antennes directionnelles a quelque peu facilité la recherche de solutions réalisables, sans toutefois produire des solutions moins coûteuses (ayant moins d'AP) ou offrant une meilleure QoS aux utilisateurs (le débit d'association est le même). Les résultats sont similaires dans le cas de EB et de EC, quoiqu'encore plus frappant. Le taux de succès à diminuer à 17% dans les deux cas et le temps de calcul et le nombre d'itération requis pour un obtenir une solution réalisable sont beaucoup plus élevés.

Avec nos jeux de données, l'utilisation d'antennes directionnelles ne permet pas d'offrir un meilleur débit aux utilisateurs ou encore de trouver des solutions utilisant moins d'AP. Toutefois, nos résultats montrent que, a priori, les antennes directionnelles favorisent la recherche de solutions réalisables en augmentant la taille de son espace. Cependant, il faut noter que notre algorithme de résolution a été conçu pour traiter spécifiquement les antennes directionnelles. En particulier, quelle que soit l'antenne traitée (omnidirectionnelle ou directionnelle), l'algorithme évalue le gain de l'antenne dans une direction donnée. Dans le cas d'une antenne omnidirectionnelle, ce gain varie très peu dans le plan horizontal et varie sensiblement dans le plan vertical. Cependant, pour traiter de manière optimale les antennes omnidirectionnelles, la littérature considère généralement l'hypothèse que le gain est constant dans toutes les directions données. Ceci permet de simplifier bon nombre de calculs et on obtient une recherche beaucoup plus efficace. Ainsi, il nous est très difficile pour l'instant de conclure sur la pertinence et l'efficacité d'utiliser des antennes directionnelles pour résoudre le problème de planification des WLAN.

4.3.2.3 Canaux disponibles

Notre modèle permet l'utilisation de tous les canaux disponibles pour le standard 802.11b, même les canaux qui se chevauchent. Cependant, dans toutes les solutions réalisables que nous avons obtenues dans EA et EB, seuls les canaux 1, 6 et 11 étaient utilisés, soient les canaux sans chevauchement. Pour EC, seulement une très petite proportion des solutions réalisables obtenues utilisaient des canaux autres que 1, 6 et 11.

Nous constatons ainsi que l'utilisation de canaux qui ne se chevauchent pas est primordiale pour satisfaire la contrainte d'interférences. Même en considérant un facteur d'interférences en fonction de la distance entre les canaux, le degré d'interférences évalué demeure trop élevé. EC a été en mesure de fournir des solutions réalisables utilisant d'autres canaux que 1, 6 et 11 étant donné que cet environnement de déploiement est réparti sur 8 étages et contient ainsi de nombreux obstacles qui atténuent la portée des interférences. Nous croyons que l'utilisation stricte des canaux 1, 6 et 11 aurait fourni autant de solutions réalisables qu'avec l'utilisation de tous les canaux disponibles. De plus, les temps de calculs auraient diminué étant donné que de nombreuses simplifications sont permises lorsqu'on ne considère pas le facteur d'interférence entre les canaux.

4.3.3 Optimisation des solutions réalisables

Dans cette section, nous discutons de l'efficacité de notre algorithme à optimiser des solutions réalisables. Pour ce faire, nous avons tenté d'optimiser 30 solutions réalisables différentes de chacun de nos trois environnements de déploiement. Nous avons essayé différentes valeurs du paramètre α pour observer comment se comportaient les solutions finales en fonction de ce paramètre. On rappelle que pour $\alpha = 0$, on ne considère que l'objectif de débit alors que pour $\alpha = 1$, seul l'objectif de coût est considéré. Le tableau suivant présente, pour EA, les moyennes et les écart-type obtenus

sur les valeurs initiales et finales de l'objectif en fonction du paramètre α et du voisinage choisi. Le taux moyen d'amélioration a été évalué en comparant la valeur finale moyenne de l'objectif à sa valeur initiale.

Tableau 4.11 – Optimisation de 30 solutions réalisables de EA avec 5 AP

Paramètre α	Valeur initiale de l'objectif		Voisinage	Valeur finale de l'objectif		Taux moyen d'amélioration
	Moyenne	Écart- type		Moyenne	Écart- type	
0	6784	216.3	VS	6472	106.6	4.6%
			VC	6413	53.5	5.5%
0,25	6348	163.2	VS	6098	63.36	4.0%
			VC	6069	28.62	4.4%
0,5	5913	110.2	VS	5740	29.10	2.9%
			VC	5719	18.21	3.3%
0,75	5744	58.29	VS	5390	29.93	1.6%
			VC	5367	11.53	2.0%
1	5042	18.21	VS	5013	15.39	0.6%
			VC	5005	8.60	0.7%

On observe que les deux voisinages fournissent un bon taux d'amélioration en termes de l'objectif du problème par rapport aux solutions réalisables obtenues à la première étape. Cependant, le taux d'amélioration de VC est légèrement supérieur au taux d'amélioration de VS. Aussi, l'écart-type des valeurs finales de l'objectif avec VC est inférieur qu'avec VS, bien qu'il ait grandement diminué dans les deux cas par rapport aux valeurs initiales. De ces faits, tout porte à croire que VC fournit systématiquement de meilleures solutions que VS. Ceci s'explique par le fait que la taille de VC est plus importante que la taille de VS. Ainsi, à chaque itération, davantage de mouvements sont explorés. De plus, les mouvements de VC tendent à moins perturber une solution au niveau de la couverture. Il est donc plus facile de réduire le coût d'une solution en changeant l'antenne d'un AP, tout en demeurant dans l'espace des solutions réalisables.

Cependant, le temps d'exécution moyen pour VC est environ trois fois plus élevé que pour VS (49.8 secondes pour VC par rapport à 15.6 secondes pour VS). Le rapport est encore plus marqué ici qu'à la première étape puisque la procédure RST-c, qui est la même quel que soit le voisinage choisi, n'est exécutée qu'à la première étape. Toutefois, étant données quand même la rapidité d'exécution de l'optimisation de solutions réalisables avec VC et la qualité supérieure des solutions obtenues, nous recommandons l'utilisation du voisinage couverture pour l'optimisation de solutions réalisables pour tout problème s'apparentant à EA.

Une autre constatation s'impose. On voit dans le tableau précédent que l'amélioration d'une solution réalisable est d'autant plus prononcée que l'objectif de débit est dominant dans la solution. Ceci s'explique par le fait que les solutions réalisables obtenues par notre algorithme sont déjà très près de la borne inférieure de l'objectif de coût. En effet, pour une solution n'ayant que des antennes omnidirectionnelles, le coût minimal théorique serait de 5000. Ainsi, le taux d'amélioration maximal théorique qui aurait pu être obtenu avec $\alpha = 1$ est de 0.83%. Pour ce qui est du débit, la borne inférieure de l'objectif correspond au nombre d'utilisateurs totaux au carré, soit 6400 pour EA, ce qui donne un taux d'amélioration maximal théorique de 5.7%. Le voisinage VC est venu très près de ces valeurs.

Finalement, il est important de remarquer que l'optimisation de solutions réalisables avec $\alpha = 1$ n'a fourni des solutions optimales (c'est-à-dire des solutions n'utilisant que des antennes omnidirectionnelles) que dans 40% des cas pour VS et 63% pour VC. Or, nous avons obtenu un taux de succès de 67% à l'étape précédente lorsque nous cherchions des solutions réalisables avec seulement des antennes omnidirectionnelles. Ainsi, lorsque l'objectif de coût domine dans les priorités du planificateur de réseau, il pourrait être intéressant de lancer une première fois l'algorithme avec seulement les antennes les moins coûteuses et, seulement dans le cas

où aucune solution réalisable n'aurait pu être obtenue, alors on lance l'algorithme en permettant toutes les antennes disponibles.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour EB pour l'optimisation de solutions réalisables. La démarche suivie est identique que pour EA.

Tableau 4.12 – Optimisation de 30 solutions réalisables de EB avec 8 AP

Paramètre α	Valeur initiale moyenne de l'objectif	Voisinage	Valeur finale moyenne de l'objectif	Taux moyen d'amélioration
0	22684	VS	22507	0.8%
		VC	22502	0.8%
0,25	18963	VS	18868	0.5%
		VC	18889	0.4%
0,5	15342	VS	15272	0.5%
		VC	15228	0.7%
0,75	11722	VS	11668	0.5%
		VC	11669	0.5%
1	8101	VS	8069	0.4%
		VC	8071	0.4%

Dans le cas de EB, on observe que notre algorithme n'a pas été en mesure de fournir un taux d'amélioration significatif sur la valeur de l'objectif des solutions réalisables. En effet, étant donné la difficulté d'obtenir des solutions réalisables, tout mouvement supplémentaire sur une solution réalisable la rend inadmissible. Aussi, on note que la valeur initiale moyenne de l'objectif des solutions réalisables obtenues est déjà « proche » de sa borne inférieure théorique (22500 pour l'objectif de débit et 8000 pour l'objectif de coût). L'amélioration a été plus prononcée pour l'objectif de débit que pour l'objectif de coût. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, notre algorithme a eu beaucoup de difficulté à produire des solutions réalisables n'utilisant que des antennes omnidirectionnelles. Plus il est difficile d'obtenir une solution réalisable, moins elle se prête à l'optimisation.

Finalement, nous présentons les résultats obtenus pour EC :

Tableau 4.13 – Optimisation de 30 solutions réalisables de EC avec 12 AP

Paramètre α	Valeur initiale moyenne de l'objectif	Voisinage	Valeur finale moyenne de l'objectif	Taux moyen d'amélioration
0	42192	VS	40272	4.6%
		VC	40189	4.7%
0,25	34666	VS	33297	3.9%
		VC	33253	4.1%
0,5	27140	VS	26427	2.6%
		VC	26505	2.3%
0,75	19613	VS	19292	1.6%
		VC	19243	1.9%
1	12087	VS	12019	0.6%
		VC	12017	0.6%

Dans le cas de EC, l'algorithme a très bien performé pour optimiser les solutions réalisables. En effet, les valeurs finales moyennes de l'objectif sont assez proches de la borne inférieure théorique (40 000 pour l'objectif de débit et 12 000 pour l'objectif de coût), surtout dans le cas de l'objectif de coût. Pour EC, la difficulté est de répartir les 12 AP du réseau sur 8 étages de manière à couvrir équitablement l'ensemble des utilisateurs. Or, chaque étage de EC étant relativement petit et parfaitement carré, il n'y a pas de contribution significative à utiliser des antennes directionnelles dans EC. Ceci explique pourquoi notre algorithme a été en mesure de s'approcher aussi près de la borne inférieure théorique du coût d'une solution. Les topologies de EA et EB se prêtent davantage à l'utilisation d'antennes directionnelles.

4.3.4 Conclusions et recommandations

Nos résultats montrent que la procédure RST-k avec le voisinage standard est plus rapide que l'utilisation du voisinage couverture, tant pour les pré-calculs que pour l'obtention de solutions réalisables. Le taux de succès plus élevé observé pour VC n'est pas suffisant pour compenser la grande augmentation des temps de calculs. Nous recommandons donc l'utilisation du voisinage standard pour l'obtention de solutions réalisables.

Ceci étant dit, VC offre certains avantages lors de l'optimisation de solutions réalisables. L'utilisation de VC par rapport à VS dépend, dans ce cas, de la taille et de la complexité du problème traité. La phase d'optimisation est, en général, assez rapide et on peut donc se permettre un plus grand temps de calcul si les solutions obtenues sont meilleures. Aussi, dans le cas d'un problème « facile », l'espace des solutions réalisables est plus grand et il est alors davantage possible d'optimiser une solution. Dans ce cas, VC offre une plus grande mobilité dans l'espace des solutions et les solutions obtenues avec VC sont meilleures que celles obtenues avec VS. Ainsi, nous recommandons l'utilisation de VC pour l'optimisation de solutions réalisables seulement lorsque la taille du problème est faible et que l'espace des solutions réalisables est grand.

Aussi, nos résultats ont montré qu'il était plus facile d'obtenir des solutions réalisables lorsque l'on considère des antennes omnidirectionnelles et directionnelles. Cependant, les antennes directionnelles étant généralement plus coûteuses, elles ne devraient être considérées que si l'objectif de coût n'est pas la première priorité du planificateur de réseau. Aussi, elles augmentent la combinatoire et la complexité algorithmique du problème et il faut s'attendre à un temps de calculs beaucoup plus important par rapport à l'utilisation d'un logiciel optimisé pour traiter des antennes omnidirectionnelles.

Notre modèle permettait l'utilisation de tous les canaux de communication disponibles, même ceux qui se chevauchent. Cependant, nos résultats expérimentaux montrent que les solutions obtenues préconisaient l'utilisation des canaux 1, 6 et 11 seulement, trois canaux qui ne se chevauchent pas. Même en considérant un facteur d'interférence entre deux canaux, le niveau d'interférence demeure trop élevé pour satisfaire la contrainte d'interférence. Ainsi, nous recommandons par la suite de n'utiliser que des canaux sans chevauchement pour résoudre le problème d'affectation. Ceci diminuera considérablement les temps de calculs, étant donné que l'évaluation de notre contrainte d'interférence requiert des calculs complexes (évaluation de logarithmes à chaque itération), ce qui ne sera plus le cas en n'utilisant que des canaux qui ne se chevauchent pas. Les solutions obtenues seront de qualité similaire.

CONCLUSION

Contributions à l'avancement des connaissances

Dans ce mémoire, nous avons abordé le problème de planification des réseaux locaux sans fil. Plus particulièrement, nos recherches se sont concentrées sur la résolution du quatrième point de la problématique, soit le positionnement et la configuration des points d'accès. L'objectif premier de ce mémoire fut de proposer un modèle mathématique du problème qui englobe les meilleures pratiques que l'on retrouve dans la littérature et de développer un algorithme qui résout efficacement le modèle proposé.

Nous avons ainsi débuté par une revue de littérature de la planification des réseaux locaux sans. Nous avons relevé les principales hypothèses, variables, objectifs et contraintes utilisés dans la littérature pour modéliser le problème. De plus, nous avons brièvement abordé les méthodes de résolution les plus couramment employées pour obtenir de bonnes solutions au problème dans des délais raisonnables.

Dans cette revue de littérature, nous avons vu que la carte de couverture ainsi que la demande en bande passante de l'environnement de déploiement sont généralement considérées connues et constituent une entrée du problème. De plus, les variables couramment employées sont la position des points d'accès, leur puissance de transmission et leur canal de communication. Plusieurs auteurs ont évoqué la possibilité de travailler avec des antennes directionnelles, mais, à notre connaissance, aucun ne l'a fait. Aussi, la plupart des modèles incluent des contraintes (ou des objectifs) de couverture, de débit, d'interférences et de coût, mais rarement ne retrouve-t-on ces quatre contraintes dans un même modèle. Aussi, à notre avis, la seule manière de garantir une qualité de service aux utilisateurs est de traiter la couverture, le débit et les interférences comme trois contraintes à satisfaire. Le coût d'un réseau constitue

davantage un objectif à minimiser. Finalement, étant donné la complexité du problème, peu de méthodes exactes sont employées pour résoudre le modèle développé et les métaheuristiques, et particulièrement la recherche avec tabous, ont semblé fournir les meilleures solutions dans des délais raisonnables. De cette analyse tirée de la littérature, nous avons été en mesure de proposer notre propre modèle, qui inclut ce que nous croyons être les meilleures pratiques trouvées dans la littérature ainsi que quelques ajouts de notre part.

Les variables de notre modèle sont la position des points d'accès, la puissance d'émission, le type d'antenne, l'angle d'orientation et le canal de transmission. À notre avis, il s'agit du seul modèle qui permet de choisir parmi plusieurs types d'antenne. Notre modèle inclut trois contraintes : une contrainte de couverture, une contrainte de débit et une contrainte d'interférences. Lorsque ces trois contraintes sont respectées, la qualité de service définie est garantie à tous les utilisateurs du réseau. Notre manière de traiter la contrainte d'interférences est particulière : l'utilisation de canaux qui se chevauchent est permise et leur impact mutuel est analysé. Notre modèle possède deux objectifs. Le premier est de minimiser le coût de déploiement du réseau. Ceci est effectué en limitant le nombre d'AP à installer et en sélectionnant davantage les antennes les moins coûteuses. Le second objectif de notre modèle est de favoriser un réseau équilibré, c'est-à-dire un réseau où les AP desservent un nombre identique d'utilisateurs. Ces deux objectifs ont été combinés en une seule fonction à minimiser. Notre modèle est compatible avec tous les standards 802.11.

Le problème, tel que nous l'avons modélisé, a été démontré NP-difficile. Nous avons donc préconisé l'utilisation d'heuristiques pour résoudre notre modèle. Dans ce mémoire, nous avons présenté l'algorithme de résolution que nous avons développé. Celui-ci se décompose en deux étapes : la première étape vise à obtenir une solution réalisable ayant un nombre minimal d'AP alors que la seconde étape vise à optimiser la solution réalisable obtenue par rapport à l'objectif du problème. On rappelle qu'une

solution réalisable est une solution qui satisfait toutes les contraintes de notre problème. Notre algorithme de résolution utilise trois recherches avec tabous. Un nouveau voisinage, basé sur la carte de couverture d'un AP, a été proposé pour augmenter l'efficacité des recherches avec tabous.

Nous avons testé notre algorithme sur trois environnements de déploiement fictifs, mais de taille représentative de WLAN courants. Les autres données de simulation utilisées étaient des données réelles. Pour de petites instances du problème, notre algorithme a fourni des solutions réalisables dans plus de 90% des cas et des améliorations significatives ont pu être apportées à ces solutions à l'aide de notre étape d'optimisation. Cependant, lorsque l'instance du problème se complexifie, le taux de succès de notre algorithme a diminué et il devenait plus difficile d'optimiser les solutions obtenues. Aussi, nous avons vu que l'utilisation d'antennes directionnelles permet d'obtenir des solutions réalisables plus facilement, pour une augmentation marginale du coût de la solution. Finalement, les solutions obtenues utilisaient dans la grande majorité des cas seulement des canaux qui ne se chevauchent pas. Il est très difficile de produire des solutions réalisables utilisant des canaux qui se chevauchent et le temps de calcul supplémentaire requis ne produit pas de meilleures solutions.

Limites, contraintes et pistes de recherche

La première limite de notre approche se situe au niveau de l'évaluation de la carte de couverture. La fonction (2.1) représente une grossière approximation de la réalité et des équations plus évoluées de propagation d'ondes existent, quoique plus coûteuses à évaluer en termes de temps de calcul. Notre modèle a été défini de telle manière qu'il faille seulement connaître la puissance reçue en un point de demande depuis un point d'accès, peu importe comment cette donnée est évaluée. Avoir travaillé avec des environnements de déploiement réels, nous aurions préconisé une approche hybride où une équation précise de la propagation d'ondes est calibrée à l'aide de

données recueillies sur le terrain. Les résultats obtenus auraient présenté un meilleur portrait de la réalité.

Une autre limite de notre approche se situe au niveau de l'évaluation du débit fourni par un AP. En fait, nous n'avons présenté aucun modèle permettant de l'évaluer et nous avons simplifié le problème en considérant qu'il était constant, peu importe le nombre d'utilisateurs associés à l'AP. Différents auteurs ont proposé des modèles qui permettent une évaluation très précise du débit fourni par un AP, mais nous avons considéré que de telles approches étaient trop lourdes en termes de temps de calcul et qu'une évaluation aussi précise n'apportait aucune contribution significative aux solutions que nous avons proposées. Ceci étant dit, dans le cas où le WLAN déployé serait sujet à des contraintes de débit très strictes, par exemple pour des applications en temps réel dans des hôpitaux, une évaluation précise du débit fourni par un AP devient essentielle et nous recommandons l'utilisation d'une méthode plus précise de la nôtre.

Comme dernière limite, nous avons considéré que seuls les AP produisaient un signal susceptible d'interférer avec les signaux des utilisateurs, mais nous n'avons pas considéré les interférences créées entre utilisateurs. Cette simplification est justifiable dans les scénarios typiques de déploiement de WLAN, c'est-à-dire lorsque ce sont en grande majorité les AP qui transmettent des données alors que les utilisateurs ne font que télécharger des informations provenant de serveurs et d'Internet. Cependant, dans le cas où certains utilisateurs mobiles seraient de type « serveur », une évaluation plus précise des interférences devrait être considérée et, en particulier, il faudrait inclure dans le calcul les utilisateurs mobiles qui ont tendance à beaucoup transmettre.

Concernant notre algorithme de résolution, nous avons vu qu'il fournit de bonnes solutions dans des délais raisonnables. Cependant, nous croyons qu'il y a encore place pour l'amélioration. En particulier, nos résultats montrent que notre algorithme est très sensible à la solution initiale générée aléatoirement. Les temps de calculs et le nombre

d'itération peuvent varier beaucoup pour l'obtention d'une solution réalisable. Ainsi, nous croyons que l'utilisation d'une heuristique d'initialisation pourrait générer davantage de solutions réalisables en moins de temps. Cette heuristique devrait néanmoins être suffisamment aléatoire pour permettre de générer des solutions ayant une bonne disparité dans l'espace de recherche. Aussi, un effort considérable devrait être déployé pour estimer dès le début de la recherche le nombre de points d'accès minimal nécessaire à l'obtention d'une solution réalisable. Nous croyons qu'il s'agit là des pistes de recherche les plus prometteuses pour réduire les temps de calcul de notre algorithme.

Aussi, notre algorithme résout un problème mono-objectif, alors que notre modèle définit deux objectifs. Certains auteurs ont discuté de la pertinence pour le planificateur de réseaux d'obtenir un ensemble de solutions « optimales » : cela offre une plus grande flexibilité pour le déploiement du réseau et fournit des solutions alternatives lorsque vient le temps d'effectuer la maintenance du réseau. Ainsi, il pourrait être intéressant de résoudre notre modèle avec une approche multi-objectifs et d'obtenir ainsi le front de Pareto de l'ensemble des solutions réalisables.

Finalement, comme dernière piste de recherche, nous proposons de valider expérimentalement les solutions proposées par notre modèle. Bien que le plus grand souci ait été mis pour que notre modèle représente fidèlement la réalité, aucune analyse pratique n'a été effectuée. Ainsi, il pourrait être intéressant de travailler avec un environnement de déploiement réel, d'implanter la solution proposée par la résolution de notre modèle et de comparer les résultats obtenus avec des données recueillis sur le terrain. Une meilleure calibration du modèle serait alors possible.

RÉFÉRENCES

- BAHRI, A. & CHAMBERLAND, S. (2005). On the Wireless Local Area Network Design Problem with Performance Guarantees. *Computer Networks*, 48, 856-866.
- Cisco Systems Inc. *Cisco Aironet 1200 Series*. Consulté le 8 mars 2007, tiré de www.cisco.com
- GAREY & JOHNSON (1979). Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. New York, NY, USA : WH Freeman & Co.
- GLOVER, F. (1990). Tabu Search: A Tutorial. *The Institute of Management Sciences, Programming Integer Algorithmes, Heuristics*. Interfaces 20, pp. 74-94.
- KOUHBOR, S., UGON, J., KRUGER, A. & RUBINOV, A. (2005). Optimal Placement of Access Point in WLAN Based on a New Algorithm. *Proceedings of the International Conference on Mobile Business*, IEEE 0-7695-2367-6/05.
- MAKSURIWONG, K., VARAVITHYA, V. & CHAIYARATANA, N. (2003). Wireless LAN Access Point Placement using a Multi-Objective Genetic Algorithm. IEEE 0-7803-7952-7/03, pp. 1944-1949.
- MATEUS, G. R., LOUREIRO, A. A. F. & RODRIGUES, R. C. (2002). Optimal Network Design for Wireless Local Area Network. *Annals of Operations Research*, (Vol. 106, pp. 331-345). Netherlands : Kluwer Academic Publishers.
- MISHRA, A., ROZNER, E., BANERJEE, S. & ARBAUGH, W. (2005). Exploiting Partially Overlapping Channels in Wireless Networks: Turning a Peril into an Advantage. *Internet Measurement Conference*, USENIX Association. pp. 311-316.

- LEE, Y., KIM, K. & CHOI, Y. (2002). Optimization of AP Placement and Channel Assignment in Wireless LANs. *Proceedings of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, 0742-1303/02.
- LING, X. & YEUNG, K. L. (2006). Joint Acces Point Placement and Channel Assignment for 802.11 Wireless LANs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 10, pp. 2705-2711.
- PRASAD, N., PRASAD, A. (2002). WLAN Systems and Wireless IP for Next Generation Communications. London, England : Artech House. ISBN 1-58053-290-X.
- PROMMAK, C., KABARA, J., TIPPER, D. & CHARNSRIPINYO, C. (2002). Next Generation Wireless LAN System Design. IEEE 0-7803-7625-0/02, pp. 473-477.
- RUNSER, K. (2005). Méthodologies pour la planification de réseaux locaux sans-fil. Ph.D., Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Wi-Fi Alliance. *WiFi Alliance Certifies 3000th Product*. Consulté le 8 mars 2007, tiré de <http://www.wi-fi.org/>

ANNEXES

Annexe A – Antennes utilisées pour la simulation

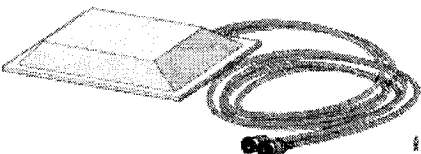
Source : www.cisco.com

Cisco Aironet 2 dBi Diversity Omnidirectional Ceiling Mount Antenna (AIR-ANT5959)

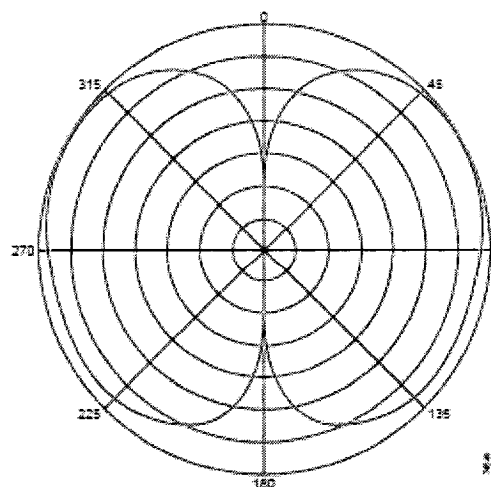
Overview

This document outlines the specifications and description of the 2-dBi diversity omnidirectional ceiling mount antenna. This antenna operates in the 2400 - 2500 MHz band and is designed for use where an unobtrusive ceiling mounted antenna is required. The antenna is compatible with Cisco Aironet radio products utilizing a reverse-polarity threaded naval connector (RP-TNC) connector.

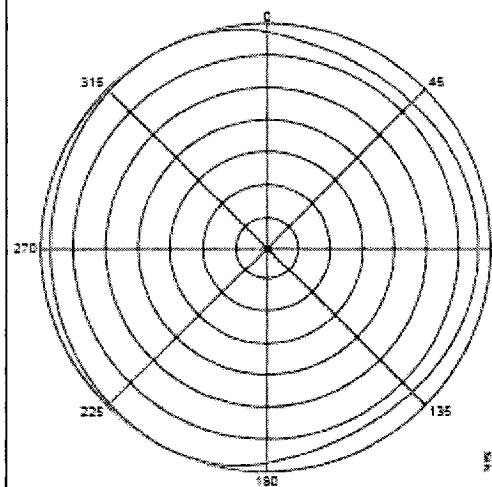
Technical Specifications

Antenna type	Omnidirectional patch	
Operating frequency range	2.4 - 2.5 GHz	
Nominal VSWR	1.7:1	
Peak gain	2 dBi	
Polarization	Vertical, linear	
Azimuth plane beamwidth	Omnidirectional	
Elevation plane 3 dB beamwidth	70 degrees	
Cable	3 ft (0.9 mm) plenum rated	
Dimensions	5.3 x 2.8 x 0.9 in (13.5 x 7.1 x 2.3 cm)	
Weight	0.3 lbs. (0.14 kg)	
Connector type	RP-TNC Male	
Environment	Indoor, ceiling mount	

E-Plane Pattern



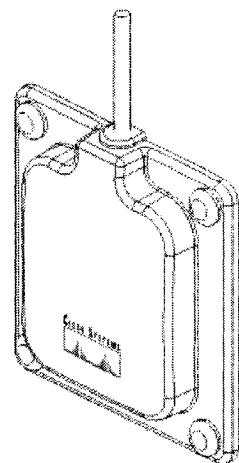
H-Plane Pattern



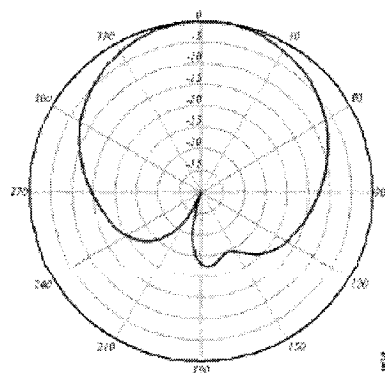
Cisco Aironet 6-dBi Patch Antenna (AIR-ANT2460P)

Technical Specifications

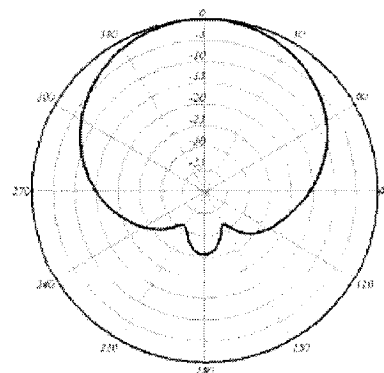
Antenna type	Single patch
Operating frequency range	2400 – 2484 MHz
Nominal input impedance	50Ω
2:1 VSWR bandwidth	2400 – 2484 MHz
Peak gain	6.0 dBi
Polarization	Linear, vertical
E-plane 3-dB beamwidth	69°
H-plane 3-dB beamwidth	75°
Front-to-back ratio	18 dB
Cross-pol discrimination	15 dB
Cable length and type	36 in. (91.4 cm) Times AA-9303 or equivalent (plenum rated)
Connector type	RP-TNC
Length	4 in. (10.1 cm)
Width	3.6 in. (9.1 cm)
Height	1 in. (2.5 cm)
Weight	
Operating temperature range	–22 F to 158 F (–30 C to 70 C)
Storage temperature range	–40 F to 185 F (–40 C – 85 C)
Environment	Indoor/outdoor



E-Plane Pattern



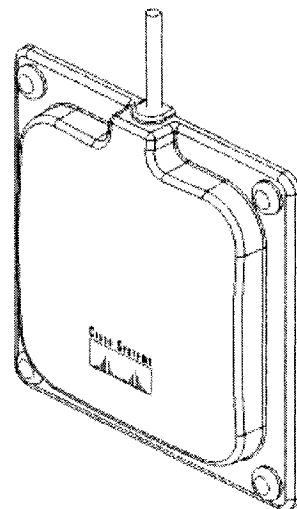
H-Plane Pattern



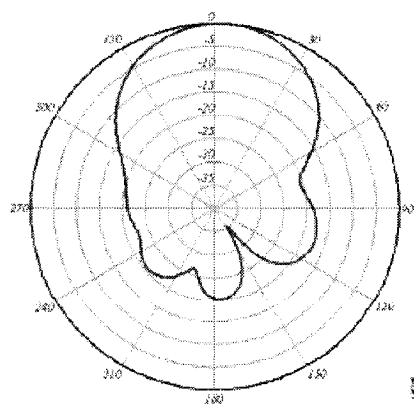
Cisco Aironet 8.5-dBi Patch Antenna (AIR-ANT2485P-R)

Technical Specifications

Antenna type	Single patch
Operating frequency range	2400 – 2484 MHz
Nominal input impedance	50Ω
2:1 VSWR bandwidth	2400 – 2484 MHz
Peak gain	8.5 dBi
Polarization	Linear, vertical
E-plane 3-dB beamwidth	56
H-plane 3-dB beamwidth	66
Front-to-back ratio	20 dB
Cross-pol discrimination	-15 dB
Cable length and type	36 in. (91.4 cm) Times AA-9303 or equivalent (plenum rated)
Connector type	RP-TNC
Length	5.1 in. (12.9 cm)
Width	5.1 in. (12.9 cm)
Height	.92 in. (2.3 cm)
Operating temperature range	-22 F to 158 F (-30 C to 70 C)
Storage temperature range	-40 F to 185 F (-40 C – 85 C)
Environment	Indoor/outdoor



E-Plane Pattern



H-Plane Pattern

